

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

ANDRESSA LUCENA MARTINS DE MIRANDA
MATRÍCULA: 2112931/3

**PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO COM
BASE NOS PARÂMETROS DA NBR 6118:2014 UTILIZANDO
SOFTWARES**

BRASÍLIA
2014

ANDRESSA LUCENA MARTINS DE MIRANDA

**PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
COM BASE NOS PARÂMETROS DA NBR 6118:2014 UTILIZANDO
SOFTWARES**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a conclusão
do curso de Engenharia Civil do
UniCEUB - Centro Universitário de
Brasília

Orientador(a): Eng.^a Irene de Azevedo
Lima Joffily

BRASÍLIA
2014

ANDRESSA LUCENA MARTINS DE MIRANDA

**PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
COM BASE NOS PARÂMETROS DA NBR 6118:2014 UTILIZANDO
SOFTWARES**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a conclusão
do curso de Engenharia Civil do
UniCEUB - Centro Universitário de
Brasília

Orientador(a): Eng.^a Irene de Azevedo
Lima Joffily

Brasília, 04 de dezembro de 2014.

Banca Examinadora

Eng.^a Civil: Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.
Orientadora

Eng.^a Civil Neusa Maria Bezerra Mota, D.Sc.
Examinadora Interna

Eng.^a Civil Eliane Kraus de Castro, D.Sc.
Examinadora Externa, UnB

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por ter permitido que essa jornada chegasse ao fim, ajudando-me na superação de muitos obstáculos encontrados pelo caminho.

À professora e orientadora Irene Joffily, pela extrema competência, conduta, dedicação, paciência e auxílio na elaboração desse projeto, além de ter contribuído na minha formação ao longo do curso de Engenharia Civil.

A todos os professores do UniCEUB, pelo conhecimento dividido ao longo dos anos.

Aos meus colegas de turma, por dividirem momentos de conhecimento, alegrias e descontrações ao longo desses quatro anos e meio.

À Ana Luiza pelo companheirismo e amizade ao longo do curso.

Aos meus pais Vagner e Andréia, e minha irmã Thalita que sempre acreditaram na minha capacidade, e me apoiaram nas minhas decisões.

Ao Pedro Jaguaribe pelo apoio, carinho e principalmente pelo incentivo e compreensão em todos os momentos.

À minha madrinha Marta.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse estudo.

RESUMO

A vida útil das estruturas de concreto armado depende do atendimento de uma série de requisitos de projeto, execução e manutenção. No entanto, este atendimento não é uma tarefa fácil, e nos últimos anos tem crescido o número de estudos para determinar a vida útil das estruturas de concreto armado, dessa forma foram criados alguns softwares com esse objetivo. Neste trabalho serão utilizados softwares disponíveis no mercado para estimar a vida útil de projeto das estruturas de concreto com base nas exigências mínimas presentes na norma ABNT NBR 6118:2014, e verificar se esses quesitos atendem a vida útil mínima de 50 anos. Além de utilizar os softwares para determinar os parâmetros de projeto para atender a vida útil mínima, intermediária e superior (50,63 e 75 anos respectivamente) de acordo com a norma ABNT NBR 15575:2013. Observou-se que os parâmetros mínimos contidos na ABNT NBR 6118:2014 não são suficientes para atender a vida útil de 50 anos. E que é preciso realizar diferentes combinações com tratamentos adicionais no aço e no concreto para obter a vida útil mínima, intermediária e superior.

Palavras Chaves: Vida útil, concreto armado, softwares.

ABSTRACT

The service life of reinforced concrete structures depends on meeting a series of requirements of design, execution and maintenance. However, this service is not an easy task, and in recent years has increased the number of studies to determine the service life of reinforced concrete structures, thereby some software were created for this purpose. In this work, software available in the market are used to estimate the project service life of concrete structures based on the minimum requirements present in ABNT NBR 6118:2014, and verify that these requirements meet the minimum service life of 50 years. And also, the software will be used to determine the design parameters to meet the minimum, intermediate and superior service life (50, 63 and 75 years respectively) according to ABNT NBR 15575:2013. It was observed that the minimum parameters contained in the ABNT NBR 6118:2014 are not sufficient to meet the service life of 50 years. And it takes hold different combinations with additional treatments in steel and concrete to achieve the minimum, intermediate and superior service life.

Keywords: Service life, reinforced concrete, software

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Problema de Pesquisa	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
1.3 Hipótese	11
1.4 Justificativas	11
1.5 Estrutura Do Trabalho	12
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 13
2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas de Concreto	13
2.1.1 Durabilidade – Conceitos e Critérios	13
2.1.2 Vida útil	14
2.1.2.1 Agressividade do Ambiente	17
2.1.2.2 Classificação dos concretos	18
2.1.2.3 Controle de fissuração	19
2.1.2.4 Tipos de cimento e adições	20
2.1.3 Agressividade do Meio x Durabilidade do Concreto	20
2.2 Mecanismos de degradação da armadura	22
2.2.1 Corrosão Das Armaduras No Concreto Armado	22
2.2.2 Passivação das armaduras	23
2.2.3 Principais mecanismos de desp passivação das armaduras	25
2.2.3.1 Carbonatação	26
2.2.3.1.1 Fatores Que Influenciam Na Profundidade De Carbonatação	28
2.2.3.2 Penetração De Íons Cloreto	31
2.2.3.2.1 Fatores Que Influenciam A Penetração De Íons Cloretos	34
2.3 Métodos De Previsão De Vida Útil	37
2.3.1 Baseados Em Experiências Anteriores	38
2.3.2 Com Base em Ensaios Acelerados	38
2.3.3 Através De Métodos Determinísticos	38
2.3.4 Através de Métodos Estocásticos ou Probabilísticos	39
2.4 Modelos De Previsão De Vida Útil	39

2.4.1 CLEAR e HAY (1973).....	39
2.4.2 TUUTTI (1982).....	40
2.4.3 SENTLER (1984).....	40
2.4.4 BOB e BOB (1991).....	41
2.4.5 PARROT (1994)	41
2.4.6 CEB (1996)	41
2.4.7 LEI DE DARCY	43
2.4.8 -1º LEI DE FICK.....	43
2.4.9 -2º LEI DE FICK.....	43
2.4.10 HELENE (1997).....	44
2.5 Softwares Para Previsão De Vida Útil	46
2.5.1 Carambola	46
2.5.2 Life 365	47
3. METODOLOGIA.....	49
3.1 Dados De Entrada Carambola.....	51
3.2 Dados De Entrada Life 365.....	53
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1 Vida útil de estrutura de concreto armado de acordo com a ABNT NBR 6118:2014	56
4.1.1 Carambola	56
4.1.2 Life 365	57
4.1.3 Life 365 X Carambola.....	58
4.2 Parâmetros para atender a vida útil de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 ..	60
4.2.1 Carambola	60
4.2.2 Life 365	62
4.2.3 Análise comparativa Carambola X Life 365.....	66
5. CONCLUSÃO.....	67
5.1 Considerações finais	67
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno de corrosão das armaduras.....	14
Figura 2: Representação da evolução dos custos em função da fase de vida da estrutura em que a intervenção é feita.	21
Figura 3 : Corrosão generalizada da armadura de uma laje devido ao ataque por cloro, com desagregação do concreto de cobertura.	23
Figura 4: Diagrama de equilíbrio termodinâmico do metal ferro em meio aquoso a 25 °C	24
Figura 5: Representação do avanço de carbonatação no tempo	27
Figura 6: Teor de CO ₂ de alguns ambientes.....	29
Figura 7: Grau de carbonatação em relação à umidade do ar.....	30
Figura 8: Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos.....	34
Figura 9: Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão.....	35
Figura 10: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras de estruturas expostas à carbonatação em função do ambiente (zona urbana, industrial, marinha ou rural), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).	44
Figura 11: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras de estruturas sujeitas à penetração de cloretos em função do ambiente (zona urbana, industrial, marinha ou rural), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).	45
Figura 12: Tela inicial do programa Carambola.....	46
Figura 13: Dados de entrada dos softwares Carambola e Life 365	50
Figura 14: Nomenclatura	52
Figura 15: Dados da estrutura adotada para estudo do software Life 365	53
Figura 16: Localização cidade de Charleston, Carolina do Sul (EUA).....	54
Figura 17: Dados da temperatura média na cidade de Charleston, Carolina do Sul (EUA)	54
Figura 18: Vida útil (Life 365 X Carambola).....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Vida útil de projeto recomendada pelos ingleses	16
Tabela 2: Vida útil de projeto recomendada pelos europeus.....	16
Tabela 3 – Vida Útil de acordo com a tabela C.6 da ABNT NBR 15575:2013.....	16
Tabela 4: Classes de agressividade ambiental (CAA).....	17
Tabela 5: Classe de agressividade ambiental, relação água/cimento, classe de concreto e cobrimento para concreto armado.	18
Tabela 6: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	19
Tabela 7: Tipos de cimento e suas composições	20
Tabela 8: Correspondência entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto	21
Tabela 9: Limites de cloretos totais permitidos no concreto de algumas Normas Internacionais.....	32
Tabela 10: Valores dos coeficientes de cura e exposição “K1 × K2”	42
Tabela 11: Valores do fator de idade “n” em função da exposição.....	42
Tabela 12: Dados de entrada utilizados no Carambola.	52
Tabela 13: Dados de entrada no Life 365.....	55
Tabela 14: Vida útil do concreto – Carambola.....	56
Tabela 15: Vida útil do concreto – Life 365.....	58
Tabela 16: Vida útil mínima, intermediária e superior.....	61
Tabela 17 – Vida útil mínima, intermediária e superior – CAA III	63
Tabela 18 - Vida útil mínima, intermediária e superior – CAA IV.....	64

1. INTRODUÇÃO

Devido aos grandes problemas nos últimos anos de degradação das estruturas de concreto armado e protendido e a preocupação com a sua segurança, observa-se um crescimento nos estudos sobre a vida útil das estruturas.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, entende-se como vida útil de projeto o período de tempo em que se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, e que sejam atendidos os requisitos de uso, inspeção e manutenção estabelecidos pelo projetista e pelo construtor, além de realizar os reparos necessários resultantes de danos acidentais.

Existem muitos mecanismos de degradação que fomentam baixos níveis de desempenho do concreto. No atual estágio de conhecimento, os fatores responsáveis são os processos físicos, químicos e biológicos (sem levar em conta os danos acidentais). Portanto a degradação do concreto armado dar-se de sua exposição aos chamados agentes agressivos presentes no meio ambiente em que se encontra (NEVILLE, 1997).

Os mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura são os mais estudados, pois é considerado o que tem mais incidência sobre a vida útil das estruturas, e maiores prejuízos econômicos. Portanto o enfoque do estudo será na deterioração da armadura pelos métodos da despassivação por carbonatação e despassivação por íons cloretos.

Muitos pesquisadores tem buscado uma metodologia eficiente para a determinação da vida útil das estruturas, e alguns softwares foram desenvolvidos com esse objetivo. Este trabalho irá utiliza softwares disponíveis no mercado, para estimar a vida útil das estruturas de concreto que seguem os requisitos mínimos de durabilidade previstos na ABNT NBR 6118:2014.

1.1 Problema de Pesquisa

Qual a vida útil das estruturas de concreto armado, segundo os softwares disponíveis, utilizando os parâmetros de projeto da NBR 6118:2014?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Verificar se os parâmetros de referência para cobrimento, resistência do concreto e relação água/cimento da NBR 6118 atendem a vida útil mínima de 50 anos de acordo com os softwares de vida útil existentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

De acordo com o objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar quais os parâmetros mínimos necessários, de projeto, para atender a vida útil intermediária e superior de acordo com a ABNT NBR 15575:2013, nas diferentes classes de agressividade.
- Verificar a dispersão entre os softwares de vida útil que serão estudados.

1.3 Hipótese

A partir dos resultados de vida útil apresentados pelos softwares, espera-se que os concretos projetados de acordo com a NBR 6118 atendam ao requisito mínimo de 50 anos de vida útil.

1.4 Justificativas

A seguir serão apresentadas as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais, ecológicas e sustentáveis para realização deste trabalho.

O estudo dos parâmetros necessários para a determinação da vida útil das estruturas contribui cada vez mais para a obtenção de softwares que apresentarão resultados confiáveis e seguros.

Determinar a vida útil de forma precisa irá contribuir para uma redução nos reparos e manutenção das estruturas que não foram prescritos pelo projetista, permitindo uma maior economia, conforto e qualidade de vida para os moradores. Além de reduzir significativamente o impacto ambiental que as construtoras geram nesses processos.

Com a preocupação em relação à sustentabilidade, Mehta e Monteiro (2008), defende o desenvolvimento da capacidade de se projetar estruturas para 500 anos ao em vez de 50, além de promover o emprego de materiais reciclados na produção do concreto como a escória e a cinza volante.

1.5 Estrutura Do Trabalho

Para melhor compreensão e entendimento desse trabalho, será apresentado a seguir de forma clara e direta, os 5 capítulos que compõe esse estudo.

Capítulo 1: Introdução. Neste capítulo é apresentado de forma resumida, o tema que será abordado nesse estudo. Traz ainda, os objetivos geral e específico, além da hipótese, justificativa e estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Neste item, são abordados de forma aprofundada os conceitos necessários para a compreensão do estudo realizado neste trabalho. E são eles: corrosão das armaduras no concreto armado, passivação das armaduras, principais mecanismos de despassivação das armaduras, durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, métodos de previsão de vida útil e modelos de previsão de vida útil.

Capítulo 3: Metodologia. Este capítulo traz a descrição das etapas e dos procedimentos adotados para a realização da pesquisa.

Capítulo 4: Apresentação e análise de resultados. No qual apresenta-se os resultados obtidos na pesquisa e em seguida a análise desses resultados de acordo com os objetivos propostos.

Capítulo 5: Conclusão. É o último capítulo do trabalho, e são descritas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa, e traz também sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas de Concreto

2.1.1 Durabilidade – Conceitos e Critérios

Anos atrás os engenheiros estruturais estudavam apenas a resistência do concreto, pois acreditava-se que a estabilidade das estruturas estaria segura para sempre. No entanto, com o passar dos anos as estruturas se mostraram deterioradas. Por isso, vem sendo estudado e discutido nos últimos anos as causas para minimizar os efeitos de deterioração das estruturas de concreto armado.

Hoje estão presentes em diversas normas do mundo inteiro, questões sobre a durabilidade e a vida útil das estruturas. Para Da Silva (2001), esses termos são tão próximos um ao outro que muitas vezes são usados de forma equivocada. A durabilidade é uma qualidade da estrutura e a vida útil é a quantificação desta qualidade. Segundo o autor, estruturas de concreto em ambientes diferentes terão durabilidade e vida útil também diferente, isso quer dizer que, a durabilidade depende tanto de sua qualidade quanto ao meio em que estiver inserido. A vida útil será abordada com maior profundidade posteriormente.

No Brasil, a ABNT NBR 6118:14 apresenta diretrizes para a durabilidade das estruturas de concreto. Com as seguintes exigências de durabilidade:

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.”

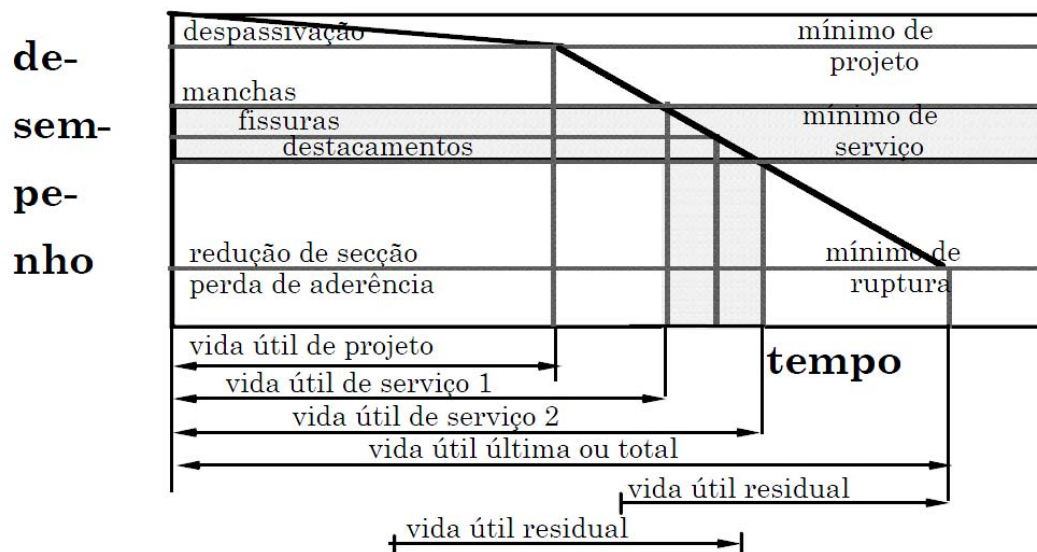
Como visto previamente na introdução desse trabalho, os processos físicos, químicos e biológicos são os fatores responsáveis por mecanismos de degradação do concreto. Portanto é necessário que se estude todos os fatores que possam afetar a durabilidade das estruturas.

2.1.2 Vida útil

A ANBT NBR 6118:2014 apresenta o conceito de vida útil de projeto, que pode ser entendido como o período de tempo em que a estrutura de concreto é capaz de manter suas características, sem que haja intervenções significativas e que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construtor. A vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo.

Helene (1993) apresenta o conceito e definição de vida útil, mostrando que podem ser distinguidas pelo menos três situações: Vida útil de projeto, vida útil de serviço ou de utilização e vida útil total. A Figura 1 apresenta o modelo de vida útil proposto por Helene (1997).

Figura 1: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno de corrosão das armaduras.



Fonte: (HELENE, 1997)

A *vida útil de projeto* corresponde ao período de tempo que vai até a despassivação da armadura, que é denominado de período de iniciação. Normalmente corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. Esse período de tempo é o período que deve ser adotado no projeto de estrutura, a favor da segurança. O fato da região carbonatada ou de certo nível de cloretos atingirem a armadura e teoricamente despassivá-la, não significa que a partir desse momento, necessariamente haverá uma corrosão importante, apesar de que em geral ela ocorre.

A *vida útil de serviço ou de utilização* corresponde ao período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento. Essa vida útil é muito variável, pois em certos locais não é admissível que estruturas de concreto apresentem manchas de corrosão ou fissuras. Já em outros casos o início da queda de pedaços de concreto pode definir o momento a partir do qual se deve considerar terminada a vida útil de serviço, pois pode comprometer a funcionalidade ou segurança da estrutura, além de colocar em risco a integridade de pessoas e bens.

A terceira denominação de vida útil é a *vida útil última ou total*, que corresponde ao período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. Nesse período há uma redução significativa da seção resistente da armadura e/ou uma perda importante da aderência armadura/concreto, ocasionando o colapso da estrutura.

Por fim, foi introduzido pelo autor o conceito de *vida útil residual*, que corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado após a realização de uma vistoria, que pode ser efetuada a qualquer instante da vida em uso da estrutura. O prazo final pode ser o limite de projeto, o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura. Portanto são três vida útil residual, uma contada até a despassivação da armadura, outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto, e a última contada até a perda significativa da capacidade resistente do componente estrutural ou eventual colapso.

Não está especificada em nenhuma norma brasileira a vida útil de projeto. Mas em princípio parece estar subentendido uma vida útil de projeto de 50 anos (HELENE, 1997). A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam a vida útil de projeto recomendada pelos ingleses e pelas normas europeias respectivamente.

Tabela 1: Vida útil de projeto recomendada pelos ingleses

BS 7543, 1992 Guide to Durability of Buildings and Buildings Elements, Products and Components	
VIDA ÚTIL	TIPO DE ESTRUTURA
≤ 10 anos	Temporárias
≤ 10 anos	Substituíveis
≥ 30 anos	Edifícios industriais e reformas
≥ 60 anos	Edifícios novos e reformas de edifícios públicos
≥ 120 anos	Obras de arte e edifícios públicos novos

Fonte: (HELENE, 1997)

Tabela 2: Vida útil de projeto recomendada pelos europeus

Comitê Europeu de Normalização CEN / EN 206, 1994	
VIDA ÚTIL	TIPO DE ESTRUTURA
1 a 5 anos	Temporárias
≥ 25 anos	Substituíveis
≥ 50 anos	Edifícios novos
≥ 100 anos	Obras de arte novas

Fonte: (HELENE, 1997)

A norma ABNT NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho, estabelece em sua tabela C.6, Vida útil de projeto mínimo, intermediário e superior, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Vida Útil de acordo com a tabela C.6 da ABNT NBR 15575:2013

Parte da edificação	Exemplos	VUP anos		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura principal	Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos.	≥ 50	≥ 63	≥ 75

Fonte: ABNT NBR 15575:2013, editada pela autora

De acordo com BARBOSA (2009), é de suma importância o conhecimento das características e dos fatores que influenciam no processo de deterioração, que são obtidos por meio de pesquisas realizadas em laboratórios e avaliações e edificações já existentes. No entanto, existe uma grande dificuldade na previsão da vida útil das estruturas, pois as características dos materiais, as condições de exposição da estrutura e os diferentes elementos estruturais de um mesmo edifício, influenciam diretamente na vida útil dessa estrutura.

2.1.2.1 Agressividade do Ambiente

De acordo com a ABNTNBR 6118:2014, a agressividade do meio ambiente está relacionada com as ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura de concreto, independente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

A agressividade do meio ambiente onde se encontra a estrutura é classificada de acordo com a Tabela 4. Onde a classe I é a mais fraca e a classe IV a mais forte, podendo ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes. O responsável pelo projeto estrutural, contendo todos os dados relativos ao ambiente em que será construída a estrutura, pode considerar classificação mais agressiva que a estabelecida na tabela 4.

Tabela 4: Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracas	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de Maré	

Fonte: (NBR 6118:2014)

2.1.2.2 Classificação dos concretos

A durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto de cobrimento da armadura (ABNT NBR 6118:2014).

Segundo Helene (1997) uma diretriz geral, encontrada na literatura técnica, destaca que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por 4 fatores, que são definidos como a regra dos 4C:

Composição ou traço do concreto;

Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;

Cura efetiva do concreto na estrutura;

Cobrimento das armaduras.

Ensaio que comprovam o desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo e classe de agressividade prevista em projetos devem estipular os parâmetros mínimos a serem atendidos. Na falta destes e devido à existência de uma forte ligação entre a relação água/cimento e a resistência a compressão do concreto e sua durabilidade, é permitido que sejam adotados os requisitos mínimos apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Classe de agressividade ambiental, relação água/cimento, classe de concreto e cobrimento para concreto armado.

Classe de Agressividade Ambiental	Relação água/cimento a/c	Classe de concreto	Cobrimento (mm)		
			Laje	Viga/Pilar	Elementos Estruturais em contato com solo
I	$\leq 0,65$	$\geq C20$	20	25	30
II	$\leq 0,60$	$\geq C25$	25	30	30
III	$\leq 0,55$	$\geq C30$	35	40	40
IV	$\leq 0,45$	$\geq C40$	45	50	50

Fonte: (ABNT NBR 6118:2014)

A resistência da estrutura ao meio ambiente não depende apenas da qualidade do concreto, mas também de critérios adequados de projeto. Por isso a ABNT NBR 6118:2014 salienta que para evitar o envelhecimento precoce da estrutura e satisfazer as exigências de durabilidade dos usuários devem ser observados os critérios de: prever drenagem eficiente; evitar formas arquitetônicas e estruturais inadequadas; garantir concreto de qualidade apropriada, particularmente nas regiões superficiais dos elementos estruturais; garantir cobrimentos de concreto apropriados para proteção das armaduras; prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressivas; definir um plano de inspeção e manutenção preventiva e controlar a fissuração das peças (HELENE, 1997).

2.1.2.3 Controle de fissuração

O risco e a evolução da corrosão da armadura nas regiões das fissuras de flexão transversais à armadura principal dependem principalmente da qualidade e da espessura do concreto de cobertura da armadura. A abertura máxima característica w_k das fissuras, sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas, desde que não exceda valores entre 0,2mm a 0,4mm, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração
Concreto Simples	CAA I a CAA IV	não há
Concreto Armado	CAA I	ELS-W ¹ (2 RODAPÉ) $w_k \leq 0,4$ mm
	CAA II E CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm

Fonte: (ABNT NBR 6118:2014)

¹ELS-W é o estado-limite de abertura das fissuras, ou seja, o estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados em Tabela 6 (ABNT NBR 6118:2014).

2.1.2.4 Tipos de cimento e adições

Estudos comprovam que adições no concreto aumentam a resistência do concreto e consequentemente a vida útil da estrutura. As adições previstas e utilizadas no Brasil são a escória, pozolana e fíler. A tabela 7 apresenta os tipos de cimento no Brasil e suas composições de acordo com as normas brasileiras apresentadas na tabela.

Tabela 7: Tipos de cimento e suas composições

TIPO	SIGLA	CLASSE	COMPOSIÇÃO (%)				NORMA BRASILEIRA
			Clínquer+Gesso	Escória	Pozolana	Fíler	
COMUM	CP I	25	100	0			NBR 5732:1991
		32					
		40					
	CP I-S	25	95 a 99	1 a 5			
		32					
		40					
COMPOSTO	CP II-E	25	56 a 94	6 a 34	0	0 a 10	NBR 11578:1991
		32					
		40					
	CP II-Z	25	76 a 94	0	6 a 14	0 a 10	
		32					
		40					
	CP II-F	25	90 a 94	0		6 a 10	
		32					
		40					
ALTO-FORNO	CP III	25	25 a 65	35 a 70	0	0 a 5	NBR 5735:1991
		32					
		40					
POZOLÂNICO	CP IV	25	45 a 85	0	15 a 50	0 a 5	NBR 5736:1991
		32					
ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	CP V- ARI	-	95 a 100	0	0	0 a 5	NBR 5733:1991

2.1.3 Agressividade do Meio x Durabilidade do Concreto

A correlação básica entre agressividade do meio ambiente e durabilidade do concreto pode ser considerada de acordo com Helene (1997) na tabela 8.

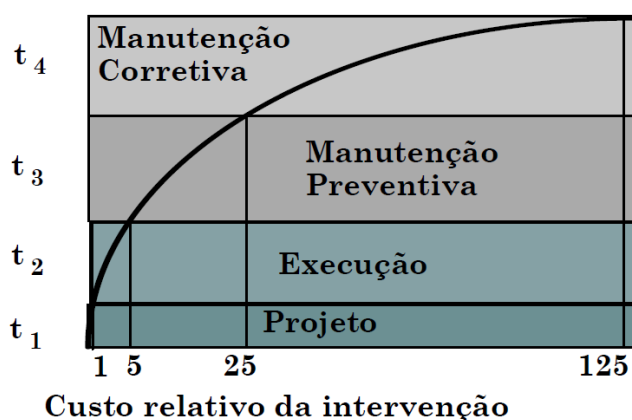
Tabela 8: Correspondência entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto

Classe de Agressividade	Concreto recomendável
I Fraca	Efêmero, normal, resistente ou durável
II Moderada	Normal, resistente ou durável
III Forte	Resistente ou durável
IV Muito Forte	Durável

Fonte: (HELENE, 1997)

Do ponto de vista econômico, todas as medidas tomadas, visando a durabilidade em nível de projeto, são mais convenientes, seguras e baratas do que medidas tomadas posteriormente. A Figura 2 apresenta a evolução dos custos em função da fase da vida da estrutura em que a intervenção é feita. Os custos de intervenção na estrutura para alcançar certo nível de durabilidade e proteção, tem um crescimento exponencial. Quanto mais tarde for essa intervenção a evolução desse custo pode ser compreendido como uma progressão geométrica de razão 5, conhecido como a lei dos 5 ou a regra de Sitter (HELENE 1997).

Figura 2: Representação da evolução dos custos em função da fase de vida da estrutura em que a intervenção é feita.



Fonte: (HELENE, 1997)

Como mostra a figura são quatro fases, a fase de projeto, fase de execução, fase de manutenção preventiva e fase de manutenção corretiva. A fase de projeto pode ser associada a um custo de número 1(um); a fase de execução implica em um custo 5 (cinco) vezes maior ao custo que acarretaria se fosse tomado uma medida equivalente na fase de projeto e a fase de manutenção preventiva e manutenção corretiva, 25 e 125 vezes respectivamente.

Como medidas na fase de projeto, entende-se toda medida tomada a nível de projeto, com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura, como aumentar o cobrimento da armadura ou o fck, reduzir a relação água cimento, especificar certas adições ou tratamentos protetores de superfície. Na fase de execução, é toda medida extra-projeto, tomada durante a fase de execução da estrutura, como por exemplo, a decisão em obra de reduzir a relação água/cimento para aumentar a durabilidade, e se essas decisões fossem tomadas na época do projeto poderia reduzir as fôrmas, o volume de concreto, o peso próprio e as taxas de armadura.

Na fase de manutenção preventiva, são as operações isoladas de manutenção dos tipos pinturas frequentes, limpeza de fachadas sem beirais e proteção, impermeabilização de cobertura e reservatórios mal projetados. A fase de manutenção corretiva corresponde aos trabalhos de diagnóstico, reparo, reforço e proteção das estruturas que já perderam sua vida útil de projeto e apresentam manifestações patológicas evidentes (HELENE, 1997).

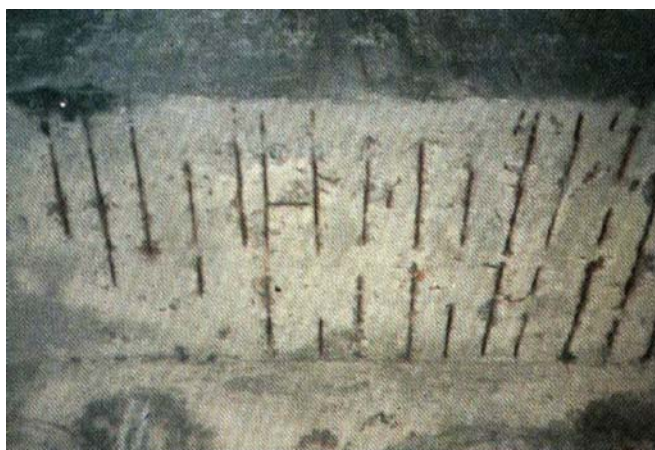
2.2 Mecanismos de degradação da armadura

2.2.1 Corrosão Das Armaduras No Concreto Armado

Pode-se definir corrosão como a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica. A oxidação e a corrosão propriamente dita podem ser consideradas como um dos principais processos de degradação que as armaduras de aço para concreto armado podem sofrer.

Segundo Gentil (1996), a oxidação está relacionada com a corrosão de caráter puramente químico e ocorre por uma reação gás/sólido na superfície do material, essa reação é caracterizada pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal. A corrosão propriamente dita é chamada também de corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado. Com isso pode surgir o aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, podendo ocasionar a fissuração e posterior lascamento do cobrimento do concreto. Esses fatores contribuem para a perda da seção transversal e de aderência entre o concreto e a armadura, impedindo que haja transferência de tensões entre os dois, podendo levar o elemento estrutural ao colapso. A Figura 3 apresenta uma corrosão da armadura em uma laje devido ao ataque por cloro.

Figura 3: Corrosão generalizada da armadura de uma laje devido ao ataque por cloro, com desagregação do concreto de cobertura.



Fonte: (HELENE 1989, apud BARBOSA 2009)

2.2.2 Passivação das armaduras

Segundo Helene (1986) durante a hidratação dos compostos silicatos de cálcio do cimento (C_3S e C_2S), é liberado uma porcentagem de hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, podendo atingir até 25% da massa total de compostos hidratados, isso resulta o ambiente altamente alcalino.

Outros álcalis presentes na pasta também contribuem para essa condição de alcalinidade (pH entre 12,5 e 13,5), apesar de ser obtida principalmente pela formação de $Ca(OH)_2$ (CARMONA, 2005).

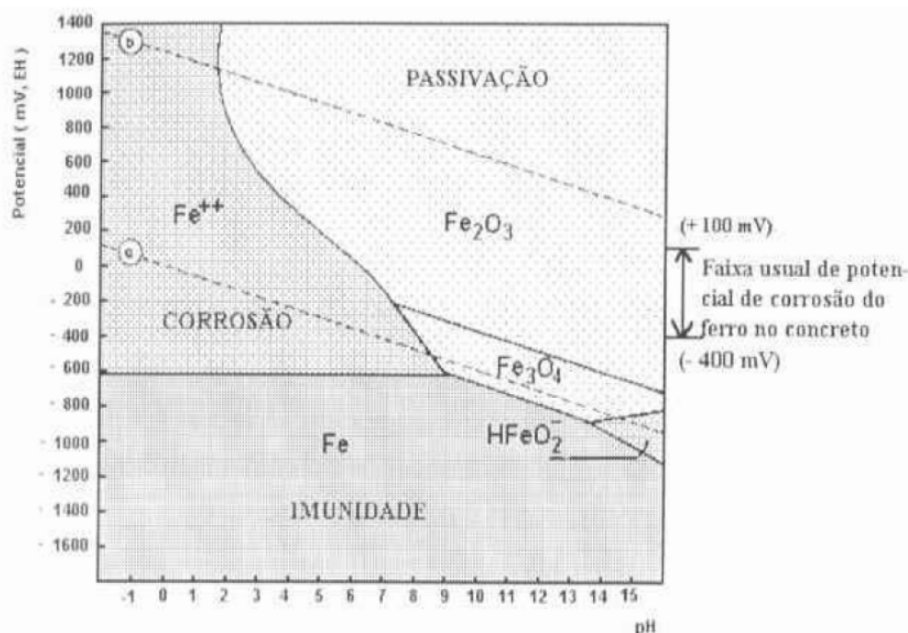
Devido ao ambiente altamente alcalino, na construção de um elemento de concreto armado, há a formação de uma película fina de óxido estável e fortemente aderente à superfície do aço. Essa película microscópica de óxidos tem sido designada como o elemento passivador do aço, assegurando proteção ao aço (BARBOSA 2009).

“Os metais em geral encontram-se na natureza na forma de óxidos. Para a extração do metal é necessário um processo de redução com introdução de energia. O processo inverso e natural de redução de energia denominado oxidação é conhecido por corrosão e representa a destruição paulatina do metal”. (ANDRADE,1992)

Existe uma interação entre os íons formados nas reações da corrosão com íons de eletrólito, e como a potencialidade da corrosão depende do pH do meio, pode-se estabelecer uma relação entre a diferença de potencial e o pH do meio aquoso (CARMONA, 2005 apud POURBAIX,1974).

Essa diferença de potencial é apresentada na Figura 4 a seguir, também conhecida como “Diagrama de Pourbaix”, que apresenta três zonas, imunidade, corrosão e passivação.

Figura 4: Diagrama de equilíbrio termodinâmico do metal ferro em meio aquoso a 25 °C



Fonte: (POURBAIX, 1974, ampliado por CASCUDO, 1997)

Na zona da imunidade, o metal permanece estável para qualquer valor de pH, portanto não ocorre corrosão. Na zona de corrosão a camada de passivação não está mais estável, portanto o pH e o potencial eletroquímico dão condições para que ocorra a corrosão. Já na zona de passivação, há a formação da película de óxidos, protegendo o aço contra a corrosão.

Portanto só há passivação do aço enquanto o concreto apresentar boa qualidade, sem fissuras e sem ação de agentes externos, conservando o elevado pH da solução contida nos poros do concreto (HELENE 1986).

2.2.3 Principais mecanismos de despassivação das armaduras

De acordo com ABNT NBR 6118:2004 e Helene (1997), existem os mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado. Os mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura: despassivação por carbonatação e depassivação por ação de cloretos. E por fim os mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita.

Pelo fato dos mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura serem o que têm maior incidência sobre a vida útil das estruturas, além de maiores prejuízos econômicos, será estudado apenas esse mecanismo no presente trabalho.

Pode-se observar, por meio de trabalhos e estudos relatados na literatura, que a corrosão de armaduras é o fenômeno mais incidente nas estruturas de concreto armado. Os principais agentes responsáveis pela perda da proteção do aço são o dióxido de carbono (CO_2) e íons cloreto (Cl^-), que penetram nos poros da estrutura de concreto até atingir a armadura, provocando o fenômeno da despassivação.

O dióxido de carbono (CO_2) está presente principalmente na atmosfera próxima das grandes cidades, e o mecanismo de despassivação pela ação do CO_2 é a carbonatação do concreto. O outro agente capaz de despassivar a armadura é o íon cloreto (Cl^-), que está presente principalmente nas áreas industriais e zonas salinas (ANDRADE e DAL MOLIN, 2003).

A seguir serão apresentados os dois mecanismos de despassivação das armaduras do concreto armado, a carbonatação e a penetração de íons cloreto, bem como os fatores que influenciam cada um desses mecanismos.

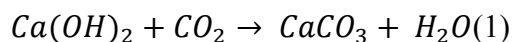
2.2.3.1 Carbonatação

O processo de carbonatação ocorre principalmente pela ação do dióxido de carbono (CO_2) que está presente na atmosfera, e outros ácidos como SO_2 e H_2S , e é um dos principais fenômenos físico-químicos que pode influenciar na vida útil das estruturas de concreto armado.

A alta alcalinidade do concreto, obtida pelo hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é liberado durante as reações de hidratação do cimento, pode ser reduzida com o tempo pela ação do CO_2 (HELENE, 1986).

Devido à redução de alcalinidade do concreto, as condições de estabilidade química da película passivante da armadura é alterada, podendo gerar condições favoráveis para o início do processo corrosivo (POSSAN, 2010).

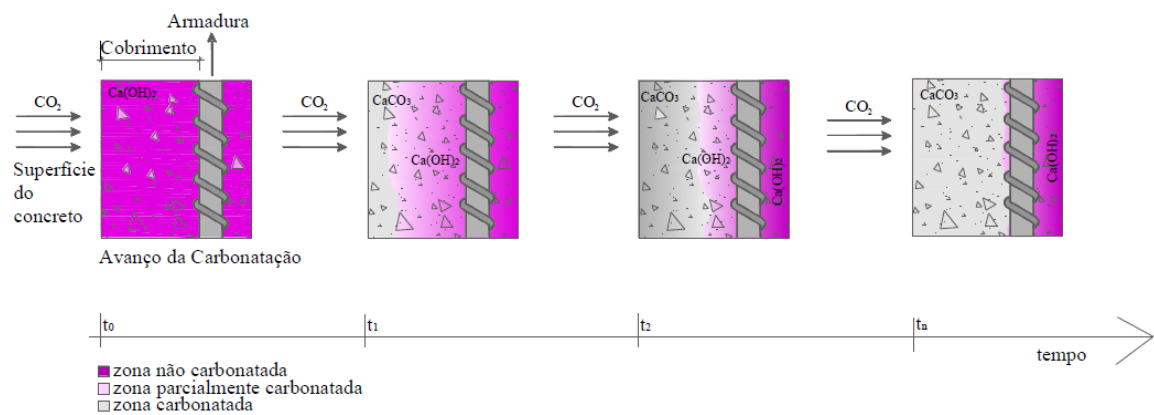
Segundo Barbosa (2009), esse processo ocorre lentamente e a reação química de carbonatação, com o produto de hidratação do cimento e o dióxido de carbono é dado pela equação química a seguir:



Essa penetração e reação de carbonatação faz com que exista uma camada carbonatada chamada de frente de carbonatação² que aumenta de espessura no decorrer do tempo e deve ser sempre mensurada com relação à espessura de concreto de cobrimento à armadura. A figura 5 apresenta a seguir o avanço da frente de carbonatação no decorrer do tempo.

²A carbonatação inicia-se na superfície da estrutura e forma a frente de carbonatação, composta por duas regiões de pH distintos, sendo a carbonatada com pH inferior a 9, e a outra não carbonatada com pH aproximadamente 12. Esta frente avança em direção ao interior do concreto e quando alcança a armadura ocorre a despassivação do aço e este se torna vulnerável.

Figura 5: Representação do avanço de carbonatação no tempo



Fonte: (Adaptado de POSSAN, 2010)

Na representação da Figura 5, observa-se que a carbonatação se inicia a partir da superfície para o interior do concreto. O dióxido de carbono (CO_2) presente no meio externo penetra o concreto por meio de difusão e transforma o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em carbonato de cálcio CaCO_3 , ocasionando a redução do pH no concreto, que originalmente está entre 12,5 e 13,5, para valores inferiores a 9.

No avanço da frente de carbonatação são constatados três zonas distintas, uma não carbonatada, uma parcialmente carbonatada e uma carbonatada, com pH aproximadamente >12,5, 10 e 8,3 respectivamente. No tempo t_0 , o concreto está com pH inalterado, ou seja, sem zona carbonatada. Com o avanço do CO_2 no concreto no tempo t_1 e t_2 , e as reações desse gás com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ocasionando o (CaCO_3) , o concreto encontra-se com uma zona parcialmente carbonatada e uma carbonatada. Quando esse processo chega nas proximidades da armadura (t_n), diz-se que a mesma está despassivada. Nesse último estágio, diz-se que a estrutura atingiu a vida útil de projeto (HELENE, 1993).

Essa difusão causada pelo ingresso de dióxido de carbono nos poros do concreto ocorre por meio de poros capilares interconectados (rede capilar), microfissuras ou bolhas de ar.

Segundo Barbosa (2009):

“Inicialmente o dióxido de carbono não se difunde ao interior do concreto porque a tendência é de se combinar, ainda na superfície, com os álcalis e o hidróxido de cálcio. Posteriormente, a tendência é de o CO_2 penetrar mais profundamente no concreto, dando continuidade ao processo de carbonatação. Vale ressaltar que o avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado à facilidade que o CO_2 encontra para difundir-se”.

Portanto, a carbonatação pode ser definida como uma reação química entre o dióxido de carbono (CO_2) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) ocasionando o carbonato de cálcio (CaCO_3) na presença de umidade (H_2O).

2.2.3.1.1 Fatores Que Influenciam Na Profundidade De Carbonatação

De modo geral, muitos estudos mostram que são vários os fatores que influenciam na profundidade de carbonatação. A seguir serão apresentados os principais fatores que afetam a carbonatação.

- **Concentração de CO_2 no ambiente**

O CO_2 é um gás presente no meio ambiente, a queima de combustíveis fósseis produz bilhões de toneladas de dióxido de carbono anualmente, e a tendência é aumentar. Segundo Da Silva (1998, apud BARBOSA 2009) a produção do CO_2 pela queima de combustíveis fósseis, representa 78% de toda sua produção, sendo 24% pelo uso dos transportes, 24% pela geração de energia, 16% na indústria, 13% no comércio e usos domésticos e os outros 22% podem ser responsabilizados pelo desmatamento.

Sua concentração na atmosfera pode ser considerada como o aspecto mais importante na análise da carbonatação do concreto, que é um fenômeno conduzido pela difusão do CO_2 para o concreto. Portanto, a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possuir uma maior concentração de CO_2 .

Segundo Helene (1993) a concentração de CO_2 no ar pode variar em atmosferas rurais de 0,03 a 0,05% em volume, de 0,1 a 1,2% em atmosferas de tráfego intenso e até 1,8% em atmosferas viciadas. A Figura 6 a seguir apresenta concentrações de CO_2 típicas de alguns ambientes naturais.

Figura 6: Teor de CO_2 de alguns ambientes

Local	Teor médio (%)	Pesquisador
Ambiente normal*	0,033	Da Silva (1998)
Ambiente normal*	0,030 a 0,050	Papadakis et al. (1989)
Campo Aberto	0,015	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo	0,075	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo ventilado	0,046	Saetta e Vitaliani (2004)
Laboratório não ventilado	> 0,100	Neville (1997)
Laboratório (sala climatizada)	0,088	Pauletti (2009)
Túneis	0,100 a 0,300	Parrot (1987)
Zona industrial	0,045	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona rural	0,030 a 0,050	Helene (1993)
Zona rural	0,035%	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona rural	0,030	Neville (1997)
Zona rural	0,0325	Schiessl (1976)
Zona rural	0,03	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona rural	0,033	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,036	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona urbana	0,100	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,08	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona urbana	0,006	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona urbana, grandes centros	0,100	Schiessl (1976)
Zona urbana, grandes cidades	0,300	Neville (1997)
Zona urbana, Madrid, Espanha	0,033 a 0,058	Da Silva (1998)
Zona urbana, margens do rio Rin, Alemanha	0,0434 a 0,0542	Schiessl (1976)
Zona urbana, região de Munich, Alemanha	0,0325 a 0,0434	Schiessl (1976)
Zona urbana, tráfego intenso	0,1 a 1,20	Helene (1993)
Zona Urbana, Grande Porto Alegre, RS	0,063	Pauletti (2009)
Zonas agressivas	1,000	Tuutti (1982)

* pode ser considerado um ambiente rural ou uma cidade com baixa taxa de poluição atmosférica.

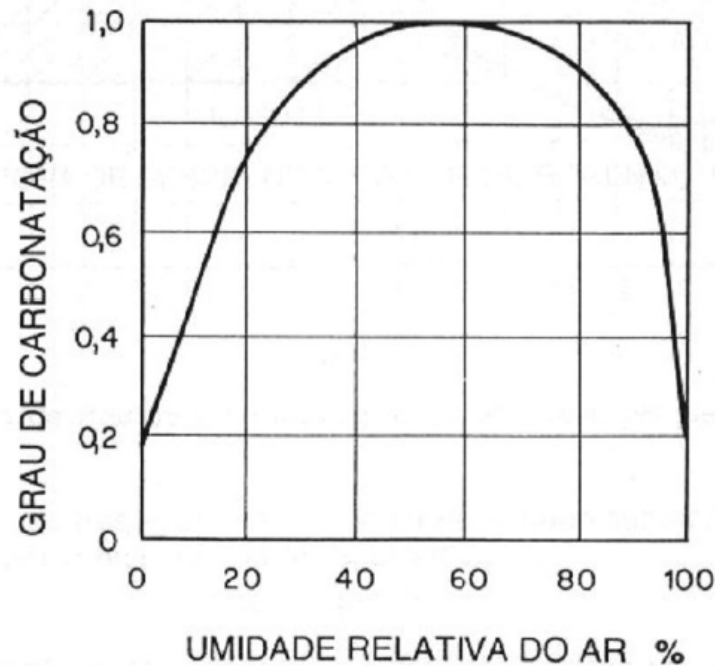
Fonte: (POSSAN, 2010)

- **Umidade Relativa (UR) do ambiente**

As condições climáticas determinam a umidade do concreto superficial e, portanto a difusão do dióxido de carbono no concreto.

A figura 7 apresenta o grau de carbonatação em relação à umidade relativa do ar.

Figura 7: Grau de carbonatação em relação à umidade do ar



Fonte: CÁNOVAS (1988) citado por (BARBOSA 2009)

Nota-se que quando a umidade é muito baixa o nível de carbonatação decresce, quando a umidade está em torno de 60% a carbonatação se eleva ao máximo, e com a umidade muito alta o nível de carbonatação reduz novamente.

De acordo com Parrot (1987, apud POSSAN,2010), o processo de carbonatação depende da quantidade de água nos poros disponíveis para dissolver os compostos hidratados, e quando a umidade for muito baixa não haverá dissolução. Se a umidade for muito alta os poros da matriz são preenchidos com água e o processo é lento.

Portanto a maior velocidade de carbonatação ocorre entre 50 e 70% de umidade relativa do ar.

- **Relação água/cimento, cura e compactação do concreto**

A relação água cimento está relacionada com a quantidade e o tamanho dos poros do concreto endurecido. Segundo Helene (1986) a redução dessa relação acarreta uma alteração significativa na dimensão dos poros e capilares, dificultando a difusão do gás carbônico através do concreto.

A cura e compactação do concreto são determinantes para a qualidade do mesmo, em razão da influência exercida por eles sobre a estrutura porosa.

Uma má compactação ou cura provocam uma alta porosidade, principalmente na superfície externa do concreto por isso é um dos parâmetros que mais influem na velocidade de carbonatação (HO & LEWIS 1987, apud CARMONA 2005). Ou seja, quanto maior o tempo de cura, maior será a hidratação do cimento, diminuindo a porosidade e permeabilidade do concreto.

Portanto a redução da relação água cimento, o aumento do tempo de cura e uma boa compactação resultam em concretos com uma menor profundidade de carbonatação.

- **Adições**

As adições pozolânicas promovem o refinamento dos poros e dos grãos do concreto, aumentando a sinuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, e também promove o aumento da resistência à compressão. Essas ações que as adições produzem nos concretos, dificulta a penetração de dióxido de carbono (CO_2) nos mesmos. Assim, quanto menor a porosidade, maior é a resistência à compressão e, conseqüentemente, menor a profundidade de carbonatação (ISAIA,1999).

Referente à adição de sílica ativa no concreto, estudos mostram que esta adição não apresenta efeito significativo sobre na profundidade de carbonatação (POSSAN, 2010).

2.2.3.2 Penetração De Íons Cloreto

O outro mecanismo de despassivação das armaduras do concreto armado é a penetração de íons cloreto. Estudos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado mostram que a corrosão nas armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos fatores mais sérios responsáveis por uma grande quantidade de danos às estruturas.

Os cloretos podem ser encontrados em abundância na natureza e podem estar juntos de agregados extraídos de regiões que no passado foram marinhas, água, aditivos aceleradores de pega que contenham cloreto de cálcio (CaCl_2), atmosferas marinhas, água do mar, regiões contaminadas por poluentes industriais ou limpeza de pisos e fachadas com ácido muriático. Apesar de os cloretos livres solúveis em água serem os únicos que podem provocar a corrosão nas armaduras, é adequado determinar o teor de cloretos totais, visto que parte dos cloretos combinados podem ficar disponíveis devido à carbonatação ou elevação da temperatura (DA SILVA, 2006).

Portanto, segundo Andrade (2001) é mais favorável determinar a quantidade limite de cloretos para despassar as armaduras em relação à massa de cimento ou de concreto, apesar de ainda existirem divergências quanto ao valor que deve ser utilizado como um padrão para a despassivação das armaduras.

A Tabela 9 a seguir apresenta os limites, de algumas Normas Internacionais, de cloretos totais permitidos no concreto.

Tabela 9: Limites de cloretos totais permitidos no concreto de algumas Normas Internacionais

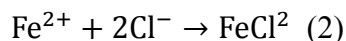
PAÍS	NORMA	LIMITES MÁXIMOS DE CONCRETO ARMADO	Referente a (ao)
		Concreto armado	
Brasil	NBR 6118	0,50%	Água de amassamento
Espanha	EH - 88	0,40%	Cimento
Estados Unidos	ACI - 222	0,20%	Cimento
	ACI - 201	0,20%	
	ACI - 318	0,30% ambiente normal 0,15% ambiente com cloreto 1,00% ambiente seco	
Europa	CEB	0,05%	Concreto
	CEB-FIP	0,40%	Cimento
	ENV 206	1,00% concreto simples 0,40% concreto armado	
Japão	JSCE SP-2	0,60 kg/m ³	Concreto

Fonte: (HELENE, 1993)

Os íons cloreto são bastante agressivos, visto que podem danificar as armaduras mesmo em condições de um pH alto nos poros do concreto, pois os íons não são consumidos no processo de corrosão, permanecendo disponíveis para novas reações. Deste modo, a presença de pequenas quantidades de íon pode provocar altas taxas de corrosão (HELENE, 1986).

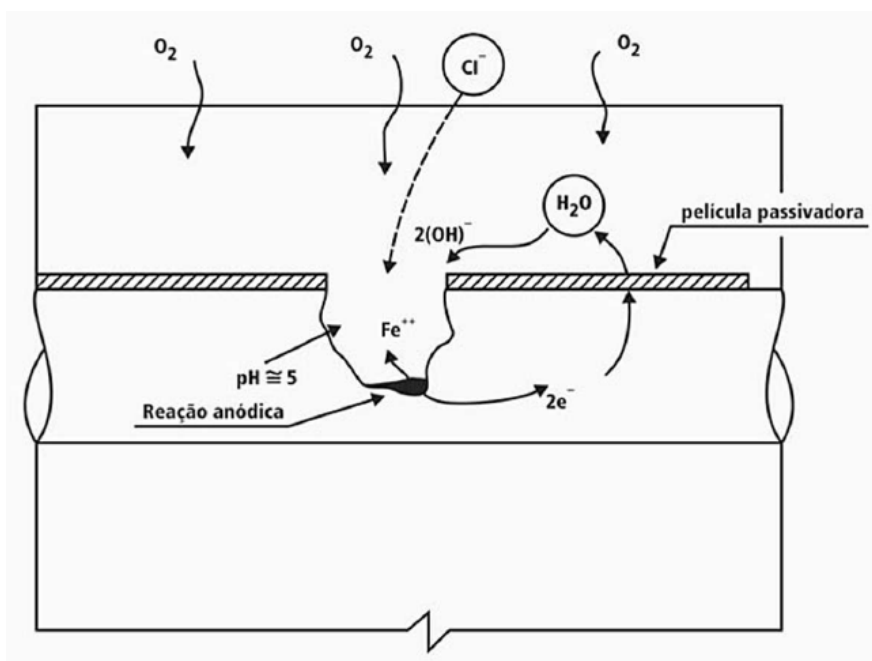
Segundo Fusco (2008) em termos médios, admite-se que a profundidade de penetração dos íons cloreto, com uma concentração maior que a concentração crítica que dissolve a película passivadora da superfície das armaduras, tenha a mesma progressão da profundidade de carbonatação.

Após o início da hidratação do cimento, uma camada de γ -Fe₂O₂ é formada e aderida ao aço fortemente. Essa película é responsável pela proteção do aço. O processo corrosivo inicia-se quando existir uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos do aço no concreto, formando-se uma célula eletroquímica onde são constituídas uma região anódica e uma região catódica, ligadas pelo eletrólito na forma de água dos poros da pasta endurecida. Para que ocorra a corrosão, é necessário que a película passivadora seja rompida. Os íons cloreto ativam a superfície do aço formando o ânodo, e o cátodo é a superfície passivada. A ação de cloretos sobre a armadura de aço se dá através das seguintes reações (NEVILLE, 1997):



A seguir, na figura 8 é apresentado um esquema da corrosão na presença de cloretos.

Figura 8: Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos



Fonte: (FUSCO, 2008)

O efeito dos íons agressivos é de baixar o pH em pontos da película passivadora, destruindo-a totalmente. São nesses pontos que é formada as zonas anódicas de pequenas dimensões, ocasionando uma intensa corrosão nesses pontos (FUSCO, 2008).

As diferenças de potencial eletroquímicas podem ter origem em diferenças do ambiente do concreto, como uma parte que permanece imersa em água do mar e outra parte exposta à molhagem e à secagem alternadas. Outra situação em que podem se formar células eletroquímicas é devido a diferenças de concentração salina na água dos poros (MISSAU, 2004).

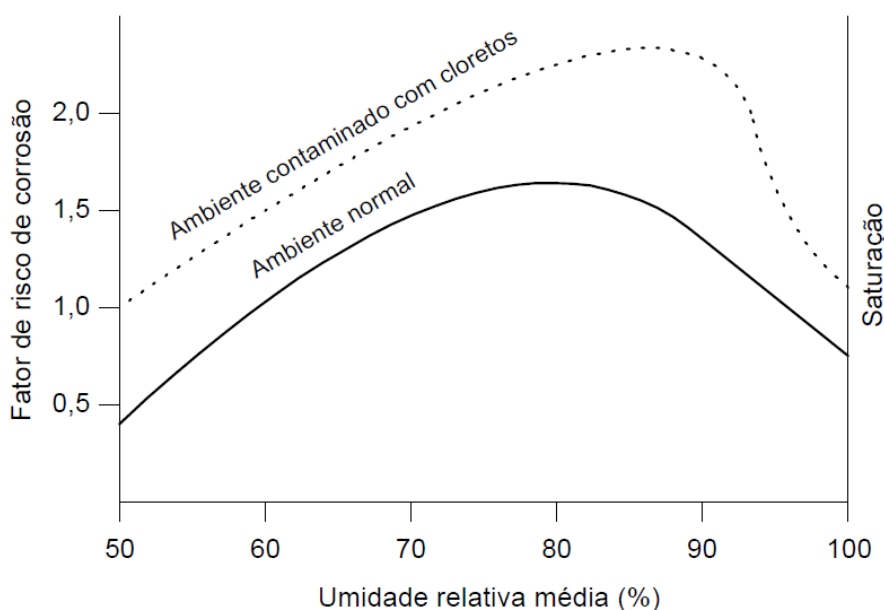
2.2.3.2.1 Fatores Que Influenciam A Penetração De Íons Cloretos

Como visto no processo da carbonatação, é de suma importância estudar os fatores que influenciam tanto na profundidade de carbonatação como na penetração de íons cloreto, pois eles influenciam significadamente na vida útil das estruturas de concreto armado. A seguir serão discutidos os pontos mais relevantes quanto à penetração dos íons cloreto.

- **Umidade Relativa (UR) do ambiente**

O transporte de íons cloreto ocorre na presença de água, e o aumento da quantidade de água no concreto propicia a movimentação dos íons cloreto no cobrimento até que eles atinjam a armadura, ocasionando a despassivação da mesma. Essa água nos poros intervém no eletrólito, afetando diretamente a difusão de gases e íons no concreto (ANDRADE, 2001). Uma relação entre o risco de corrosão e a umidade relativa média está representada na Figura 9.

Figura 9: Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão



Fonte: (CEB, 1993 apud ANDRADE, 2001)

Segundo Da Silva (2006), quando o grau de umidade é baixo, a resistividade elétrica de argamassas é alta, o que dificulta a mobilidade dos íons. Quando os poros do concreto estão saturados de água a resistividade é baixa, porém o oxigênio tem dificuldade de chegar até a armadura. Deste modo, as máximas velocidades de corrosão em concreto ocorrem em um alto grau de umidade, porém não saturado. Assim o oxigênio pode chegar livremente até a armadura e a resistividade é suficientemente baixa para que ocorram grandes velocidades de corrosão.

- **Tipo de Cimento e adições**

Muitos estudos têm sido realizados sobre a influência do tipo de cimento na durabilidade dos concretos.

A quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) presente no cimento a ser utilizado em concretos é determinante na intensidade da corrosão. Os íons cloreto reagem com o C_3A , formando o cloroaluminato de cálcio hidratado ou sal de Friedel ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Esse sal é insolúvel e diminui o fluxo de penetração de cloretos, reduzindo a concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. Quanto maior o teor de C_3A no cimento, menor é a concentração livre de cloreto, devido à formação dos cloroaluminatos, logo maior será a resistência à corrosão (DA SILVA, 2006).

De acordo com Andrade (2001), a inserção de adições minerais nos cimentos como a sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante, metacaulium e escória granulada de alto forno, minimizam a penetração de agentes agressivos no concreto. Em uma análise comparativa entre alguns tipos de cimentos, os cimentos com escória e de alto forno e cinza volante apresentaram uma maior proteção ao concreto em relação aos outros tipos de cimento, como por exemplo, o cimento Portland comum. Isso ocorre devido o melhor refinamento dos poros e aos elevados teores de C_3A .

Ainda segundo o mesmo autor, por meio de estudos de corpos-de-prova que foram imersos em solução de cloretos, foi observado uma significativa redução no coeficiente de difusão de cloretos obtida com a inclusão de sílica ativa nos concretos. O autor observou que houve um efeito benéfico no estudo de GJORV et AL.(1994), onde ocorreu uma redução da ordem de 75% na difusão de cloretos em concretos, com adição de 9% de sílica em relação à massa de cimento. E também no estudo de BARATA (1998), observou uma redução de mais de 90% para concretos com 20% de adição de sílica ativa, para uma relação a/c igual a 0,47.

Dentre os aditivos utilizados, pode-se destacar o uso de aditivos inibidores de corrosão, que é um método de proteção das barras de aço imersas no concreto e possuem a vantagem relativa do fácil uso por serem dissolvidos em água e adicionados direto à mistura. Destacam-se entre os inibidores mais utilizados os à base de nitritos (NO_2^-).

- **Temperatura**

A temperatura é outro fator que influencia na velocidade de corrosão, porém de menor intensidade. Segundo Da Silva (2006) a temperatura age aumentando a cinética, ou seja, há uma maior agitação das moléculas, ocasionando uma maior mobilidade iônica, o que favorece o seu transporte para o interior do concreto. E que concretos submetidos a uma temperatura de 40°C apresentam uma maior quantidade de íons cloretos, cerca de 2,06 vezes mais do que concretos expostos à temperatura de 20°C.

Esse fato pode ser observado em estruturas localizadas em regiões mais quentes, que se deterioram mais rapidamente do que estruturas encontradas em regiões frias.

- **pH das soluções contidas nos poros**

A alcalinidade da solução contida nos poros do concreto influencia na capacidade de fixação de cloretos, e também no avanço da sua frente de penetração. Quanto maior o pH da solução, menor é a capacidade de fixação de cloretos. Para valores de pH menores, como na carbonatação, há a desestruturação dos compostos formados, sendo desfeita a combinação dos íons cloreto, provocando um aumento na quantidade de íons livres no concreto, podendo penetrar no mesmo e acarretar a despassivação da armadura (DA SILVA, 2006).

2.3 Métodos De Previsão De Vida Útil

A vida útil do concreto armado pode ser estimada baseada em alguns métodos. Segundo Clifton (1990 apud POSSAN 2010), existem cinco métodos que podem ser usados com esse propósito:

- (i) Estimativas baseadas em experiências anteriores;
- (ii) Predições baseadas na comparação de desempenho;
- (iii) Testes acelerados de degradação;
- (iv) Métodos estocásticos e teoria de confiabilidade;
- (v) Modelos matemáticos baseados nos processos físicos-químicos de degradação.

No Brasil, Helene (1997) apresenta quatro métodos de previsão de vida útil de estruturas de concreto, que se assemelham com as descritas por Clifton (1990), os quais serão descritos a seguir.

2.3.1 Baseados Em Experiências Anteriores

Esse método consiste, de forma empírica, garantir a durabilidade da estrutura baseado no julgamento de especialistas, ou seja, baseadas em experiências anteriores. A primeira norma sobre estruturas de concreto armado data de 1903, e era Suíça, e desde então o cobrimento é visto como o principal parâmetro de durabilidade. Nos dias de hoje esse método não é muito utilizado para se determinar a vida útil das estruturas de concreto devido aos avanços tecnológicos encontrados atualmente.

2.3.2 Com Base em Ensaaios Acelerados

Este método foi introduzido por americanos em 1978 com a norma ASTM E 632. De acordo com Possan (2010) este método sugere a realização de ensaios acelerados de durabilidade, ele visa a determinação de um fator de relação da durabilidade com a evolução observada dos danos em condições natural de envelhecimento. Essa relação é denominada coeficiente de aceleração, e expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação natural.

De acordo com Helene (1997) esse método se aplica melhor em estudos de produtos orgânicos e é de difícil aplicação direta no projeto de estruturas de concreto. Porém no futuro esse método pode ser mais utilizado na construção de estrutura de concreto, visto que tem havido um grande desenvolvimento de métodos de ensaio acelerados, de fundamento eletroquímico, em câmaras de carbonatação e em câmaras de “salt-spray”.

2.3.3 Através De Métodos Determinísticos

Este método tem como base científica os mecanismos de transporte de gases, massa e íons através dos poros do concreto, ou seja, se baseia nos mecanismos físicos relacionados com a deterioração das estruturas, considerando especialmente a corrosão da armadura e a deterioração do concreto.

Porém no caso do concreto ainda não existem modelos matemáticos satisfatórios, sendo possível apenas fazer considerações qualitativas de durabilidade. Já nos casos relacionados à armadura, os modelos de previsão estão bastante desenvolvidos, e podem ser descritos pela Lei de Faraday, equação de Darcy, primeira e segunda Lei de Fick, entre outras (HELENE, 2007).

2.3.4 Através de Métodos Estocásticos ou Probabilísticos

Muitos são os fatores aleatórios que envolvem os processos de produção, degradação e utilização das estruturas de concreto. Portanto a vida útil não pode ser estimada precisamente, logo o emprego de métodos estocásticos ou probabilísticos são de interesses quando se deseja considerar incertezas na estimativa de vida útil. Este método fornece estimativas mais próximas à realidade, visto que se consegue inserir nos modelos de comportamento as variabilidades do processo de degradação das estruturas (POSSAN, 2010).

Para Helene (1997), este é o método mais moderno e realístico para a análise da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. Houve um importante avanço no que diz respeito a esse método, e provavelmente, num futuro próximo as normas internacionais já contenham um novo estado limite, chamado de estado limite de durabilidade.

2.4 Modelos De Previsão De Vida Útil

A seguir serão apresentados alguns modelos que servem como base para prever a vida útil das estruturas de concreto armado em relação aos fenômenos da despassivação por carbonatação e por penetração de íons cloreto. Os modelos apresentados segundo Andrade (2001) são os de Clear de Hay (1973), Lei de Darcy, 1º Lei de Fick e 2º Lei de Fick; os modelos apresentados por Carmona (2005) são os de Tuutti (1982), Sentler (1984) e Ceb (1986); e os modelos apresentados por Possan (2010) são os de Bob e Bob (1991) e Parrot (1994).

2.4.1 CLEAR e HAY (1973)

$$t = \frac{2,5 \times 10^4 \sqrt{e}}{a/c \times \left(\frac{2,38}{\sqrt{c_{cl}}} \right)} \quad (4)$$

Onde:

t = tempo (anos);

e = espessura de cobrimento (mm);

a/c = relação a/c do concreto (kg/kg);

C_{cl} = concentração de cloretos no meio ambiente (%).

2.4.2 TUUTTI (1982)

$$e_c = k_{CO_2} \times \sqrt{t} \quad (5)$$

Onde:

e_c = espessura carbonatada (mm);

t = tempo em anos ou meses;

k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$).

2.4.3 SENTLER (1984)

Determinista:

$$e_c = \sqrt{\left(\frac{2 \times D_{CO_2}}{a}\right) \times dp \times t} \quad (6)$$

Estocástico:

$$f(e_c, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2 \times \pi \times t^{0.5})^{0.5}} \right] \frac{(e_c - e_0 - \mu \times t^{0.5})^2}{2 \times \sigma^2 \times t^{0.5}} \quad (7)$$

Onde:

D_{CO_2} = coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s);

a = concentração dos constituintes do concreto que podem carbonatar (Kg/m^3);

dp = diferença parcial de pressão do CO_2 (Kg/m^3);

$f(e_c)$ = função de densidade normal com média $e_0 + \mu \times t^{0.5}$ e variância $\sigma^2 \times t^{0.5}$ (unidade de tempo em segundos);

e_0 = carbonatação mais rápida que ocorre na superfície do concreto.

2.4.4 BOB e BOB (1991)

$$e_c = 150 \times \left(\frac{c \times k \times d}{f_c} \right) \times \sqrt{t} \quad (8)$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação média(m);

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

c = coeficiente do tipo de cimento;

k = coeficiente da umidade relativa (condições ambientais);

d = coeficiente referente à quantidade de CO_2 ;

t = tempo (anos).

2.4.5 PARROT (1994)

$$e_c = 64 \times \frac{K^{0.4} \times t^n}{c^{0.5}} \quad (9)$$

$$n = 0,002536 + 0,01785 \times UR - 0,0001623 \times UR^2 \quad (10)$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação (m);

K = permeabilidade do oxigênio no concreto para uma umidade relativa de 60% (m^2/s);

c = concentração de CaO no concreto (mol/Kg);

n = coeficiente em função da Umidade Relativa;

t = tempo (anos).

2.4.6 CEB (1996)

$$e = k_{CO_2} \times \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \times \sqrt{t} \quad (11)$$

$$k_{CO_2} = \sqrt{\frac{2 \times D_{CO_2} \times C_s \times K_1 \times K_2}{a}} \quad (12)$$

$$D_{CO_2} = 10^{-\left(7 + 0,025 \frac{f_{ck}}{10}\right)} \quad (13)$$

Onde :

e = profundidade de carbonatação (m);

D_{CO_2} = coeficiente de difusão do CO_2 no concreto carbonatado (m^2/s);

C_s = concentração de CO_2 no ar (Kg/m^3);

a = teor de CaO em $1m^3$ de concreto (Kg/m^3)

t = tempo (s);

t_0 = tempo de cura;

n = fator de idade;

$K_1 \times K_2$ = coeficiente de cura e exposição;

k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação;

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa).

Pode-se adotar:

$\frac{C_s}{a} = 7 \times 10^{-6}$ para concretos normais de cimento portland em ambientes convencionais;

Tabela 10: Valores dos coeficientes de cura e exposição “ $K_1 \times K_2$ ”

Tipo de exposição	Cura	$K_1 \times K_2$
Interior	Boa	1,0
Interior	Má	2,0
Exterior	Boa	0,5

Tabela 11: Valores do fator de idade “ n ” em função da exposição.

Tipo de exposição	n
Interior	0,0
Exterior protegida	0,1
Exterior não protegida	0,4

2.4.7 LEI DE DARCY

$$v = k \times \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (14)$$

Onde:

v = velocidade de percolação da água (m/s);

k = coeficiente de permeabilidade da água no concreto (m/s)

H = pressão da água (mca);

x = espessura de concreto percolado pela água (m);

Q = vazão de água percolada (m³/s).

2.4.8 -1º LEI DE FICK

$$Q_s = -Def_{cl} \times \frac{\delta c}{\delta e_{cl}} \quad (15)$$

Onde:

Q_s = fluxo de íons na direção x ;

Def_{cl} = coeficiente efetivo de difusão, também chamado de difusividade;

$\frac{\delta c}{\delta e_{cl}}$ = gradiente de concentração;

C = concentração de íons na solução;

e_{cl} = profundidade considerada.

2.4.9 -2º LEI DE FICK

$$\frac{ce_{cl}-Co}{Cs-Co} = 1 - \text{erf} \left(\frac{e_{cl}}{2 \times \sqrt{Def_{cl} \times t}} \right) \quad (16)$$

Onde:

ce_{cl} = concentração dos cloretos na profundidade e_{cl} , no tempo t ;

Co = concentração inicial de cloretos no interior do concreto da estrutura;

C_s = concentração de cloretos na superfície da estrutura de concreto, admitida constante;

erf = função de erro de Gauss;

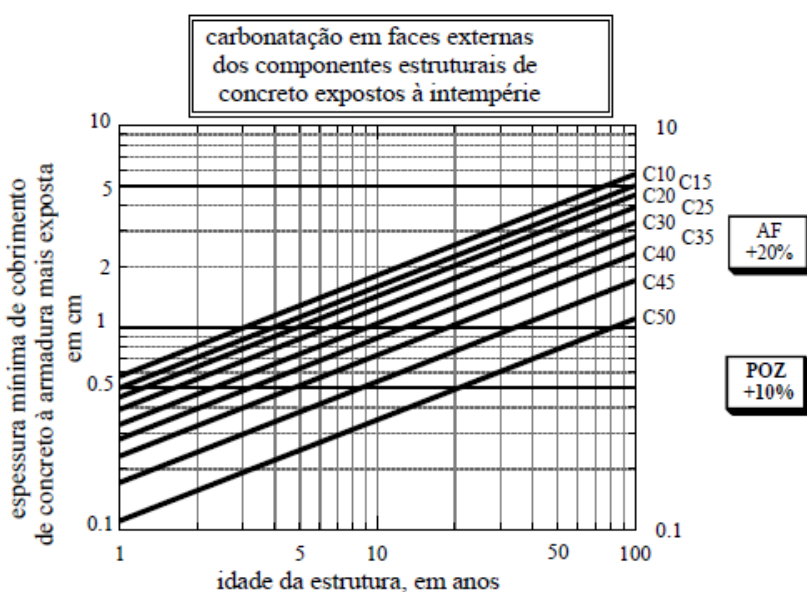
Def_{cl} = coeficiente efetivo de difusão, ou difusividade, variável com a temperatura, geralmente em m^2/s ;

t = duração de tempo considerado.

2.4.10 HELENE (1997)

Helene (1997) apresenta dois ábacos deterministas para a obtenção de cobrimentos de armaduras. A figura 10 corresponde ao primeiro ábaco de uma estrutura sujeita a um ambiente agressivo no qual a ação do gás carbônico predomina (carbonatação). Observa-se que uma mesma vida útil pode ser alcançada por diferentes pares de “cobrimento / resistência do concreto”.

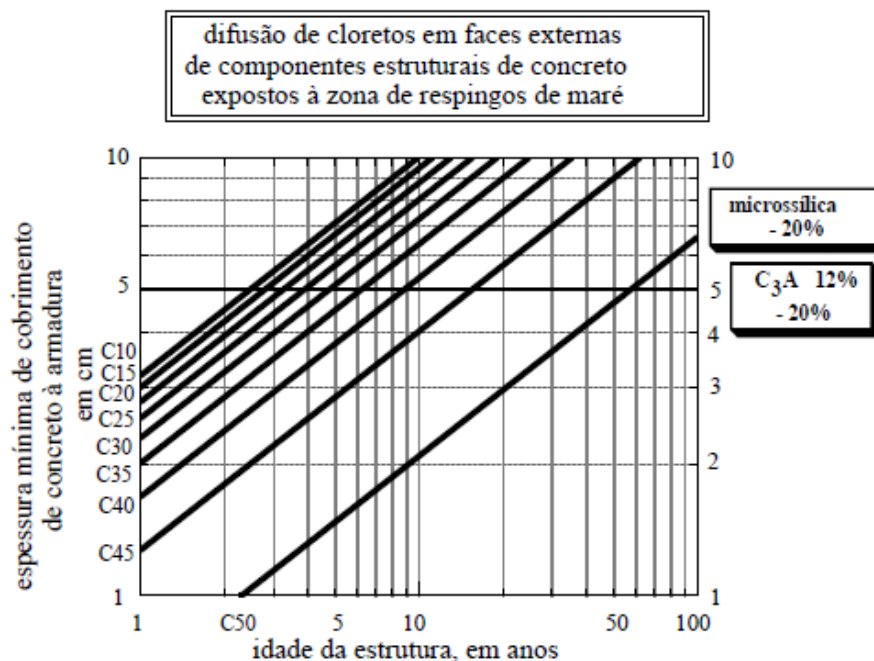
Figura 10: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras de estruturas expostas à carbonatação em função do ambiente (zona urbana, industrial, marinha ou rural), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).



Fonte: (HELENE, 1997)

A figura 11 apresenta o segundo ábaco para o caso de estrutura de concreto situada em zona de variação de maré e respingos que é considerada uma das situações naturais mais agressivas ao concreto armado.

Figura 11: Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras de estruturas sujeitas à penetração de cloretos em função do ambiente (zona urbana, industrial, marinha ou rural), do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).



Fonte: (HELENE, 1997)

Segundo Helene (1997) para a Figura 10, caso sejam utilizados cimentos Portland com escórias de alto forno ou com pozolanas as espessuras mínimas características de cobrimento de concreto à armadura, devem ser aumentadas em pelo menos 20% e 10%, respectivamente. E para a Figura 11 caso sejam utilizadas adições de 8% de sílica ativa ou empregados cimentos Portland com teor de $C_3A \geq 12\%$, as espessuras mínimas características de cobrimento de concreto à armadura, podem ser reduzidas em 20%.

Apesar do resultado desse ábaco ser a espessura do cobrimento, é possível calcular a constante k_{CO_2} conhecendo a idade da estrutura, a espessura carbonatada ou o perfil de penetração de cloreto. De posse desses coeficientes, é possível descobrir a velocidade e avanço da frente de carbonatação e de cloretos, e calcular o tempo que levará até chegar à armadura.

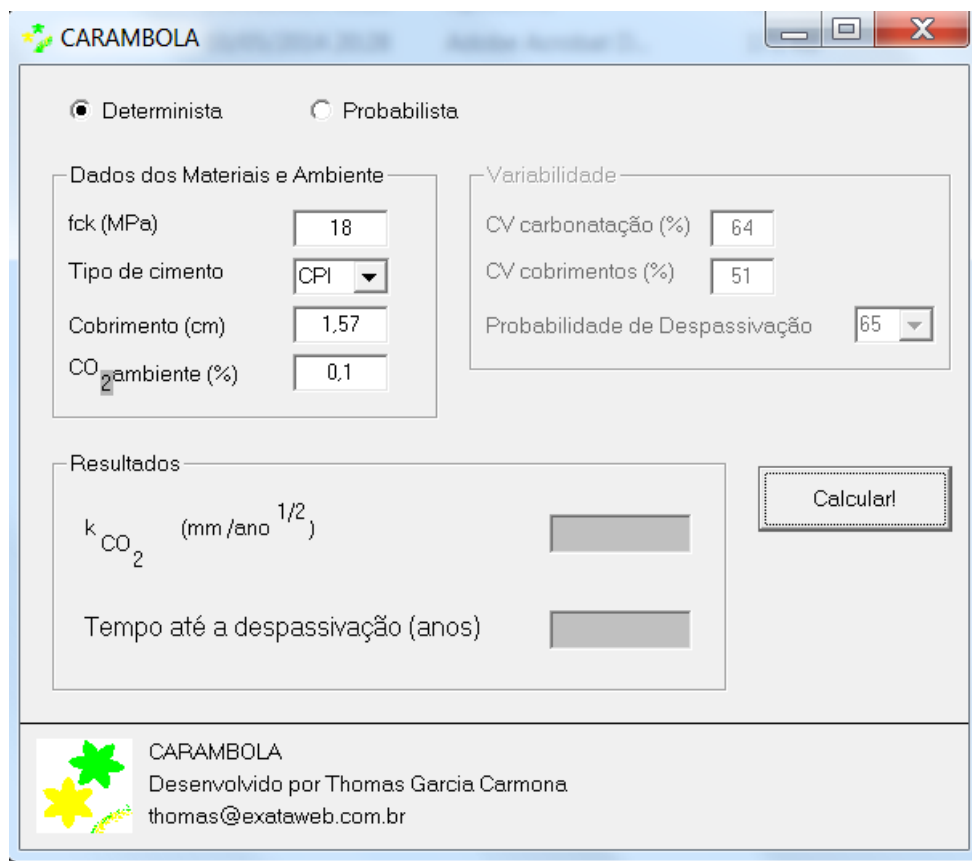
2.5 Softwares Para Previsão De Vida Útil

2.5.1 Carambola

O programa CARAMBOLA foi desenvolvido na dissertação de mestrado do Thomas Garcia Carmona em 2005. O modelo usado no software foi o de Helene (1997), para despassivação por carbonatação. E é possível calcular a vida útil tanto pelo método determinista como pelo método probabilista para previsão do período de iniciação.

O cálculo determinista é realizado encontrando-se o valor do período de iniciação “t” necessário para que a profundidade de carbonatação se iguale ao cobrimento de armaduras fornecidos. No caso do cálculo probabilista se supõe distribuições normais para a carbonatação e para os cobrimentos (CARMONA, 2005). A figura 12 apresenta a tela inicial do programa.

Figura 12: Tela inicial do programa Carambola



A interface do programa CARAMBOLA é exibida em uma janela com o título "CARAMBOLA". No topo, há uma barra de ferramentas com ícones de minimizar, maximizar e fechar. Abaixo, há duas opções de seleção: "Determinista" (selecionada) e "Probabilista".

Existem duas seções principais de entrada de dados:

- Dados dos Materiais e Ambiente:**
 - fck (MPa): 18
 - Tipo de cimento: CPI (menu suspenso)
 - Cobrimento (cm): 1,57
 - CO₂ ambiente (%): 0,1
- Variabilidade:**
 - CV carbonatação (%): 64
 - CV cobrimentos (%): 51
 - Probabilidade de Despassivação: 65 (menu suspenso)

Na seção "Resultados", há dois campos de saída:

- k_{CO₂} (mm/ano^{1/2}): campo vazio
- Tempo até a despassivação (anos): campo vazio

Um botão "Calcular!" está localizado à direita dos campos de resultados.

No rodapé, há um logotipo com uma flor verde e amarela, seguido pelo texto: "CARAMBOLA", "Desenvolvido por Thomas Garcia Carmona" e "thomas@exataweb.com.br".

Helene (1997) adota 25% para Coeficiente de variação da carbonatação e cobrimentos.

Concentração de CO₂ = 0,1% (Valor admitido supondo atmosfera de tráfego intenso segundo HELENE, 1993).

A fórmula para o cálculo da probabilidade da despassivação é apresentada a seguir:

$$g' = \frac{-(\mu_{carb.} - \mu_{cobrim.})}{\sqrt{(\mu_{carb.} \times CV_{carb.})^2 + (\mu_{cobrim.} \times CV_{cobrim.})^2}} \quad (17)$$

$$P(G < 0) = 1 - P(g > g') \quad (18)$$

Onde:

g' - média de carbonatação

$\mu_{carb.}$ - Profundidade de carbonatação (cm)

$\mu_{cobrim.}$ - Cobrimento (cm)

$CV_{carb.}$ - Coeficiente de variação da carbonatação

$CV_{cobrim.}$ - Coeficiente de variação do cobrimento

$P(G < 0)$ - Probabilidade de despassivação.

O valor para $P(g > g')$ encontra-se na tabela de distribuição normal.

2.5.2 Life 365

Em 1999 foi criado um consórcio de empresas norte americanas para desenvolver um software que fosse possível estimar a vida útil de estruturas de concreto armado. Em outubro de 2000 foi introduzida no mercado a primeira versão do Life 365. Ao longo dos anos foram realizadas revisões do software e foram criados mais dois consórcios, um em 2005 e o outro em 2010, com o objetivo de dar continuidade e melhorar o software. E em julho de 2013 foi liberada a versão mais recente, Life-365 v2.2.

O Life 365 é um software que foi desenvolvido para estimar a vida útil do concreto armado, inserir sistemas de proteção contra corrosão para reduzir o custo do ciclo de vida da estrutura que são expostas a cloreto, entre outros.

O período de iniciação é calculado por meio do modelo de difusão representada pela 2ª Lei de Fick. Já o período de propagação é fixado em 20 anos para barras de aço revestidas com epóxi e 6 anos para os demais tipos de proteção ou adição

A vida útil de projeto para barras de aço revestida com epóxi é a mesma para barras sem esse tipo de revestimento, porém a vida útil de propagação para as barras com epóxi aumenta de 6 para 20 anos. Como o objetivo do trabalho é estudar a vida útil de projeto e não a de propagação, não será estudada as barras de aço com revestimento epóxi.

O Life 365 apresenta a opção de escolher adições de concreto, como a cinza volante, escória e sílica ativa. Disponibiliza também a opção de proteção superficial do concreto, podendo optar entre selante e membrana, proteções do aço como aço inoxidável, e inibidores de corrosão Nitrato de Cálcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ em diferentes concentrações.

Segundo a norma EN 1504 (2006) os métodos de proteção superficial são impregnação hidrofóbica, impregnação e revestimento. A impregnação hidrofóbica é um tratamento do concreto destinado a produzir uma superfície repelente à água, e os componentes ativos podem ser silicanos ou siloxanos, que são um dos principais componentes químicos dos selantes. O revestimento ou revestimento por pintura é um tratamento destinado a produzir uma camada protetora contínua sobre a superfície do concreto, ou seja, uma membrana. O principal ligante é o polímero, portanto é indicada para esse caso uma pintura com tinta epóxi ou poliuretano que é um tipo de polímero.

Aço inoxidável é o nome dado à família de aços com altos níveis de resistência à corrosão e ao calor contendo no mínimo 10,5% de cromo. Isso é resultado da adição controlada de elementos de liga como níquel e molibdênio, cada um deles originando atributos específicos com relação à resistência mecânica e possibilidade de resistir a diferentes meios ambientes.

Os inibidores de corrosão são definidos como um componente químico que, quando adicionado em quantidades adequadas, pode prevenir a corrosão da armadura de aço e não tem efeitos contrários às propriedades do concreto. Atua junto às superfícies das armaduras, podendo retardar, reduzir ou mesmo impedir a corrosão do aço e não afeta de forma adversa as propriedades da mistura, seja no estado fresco ou endurecido (SILVA 2008).

3. METODOLOGIA

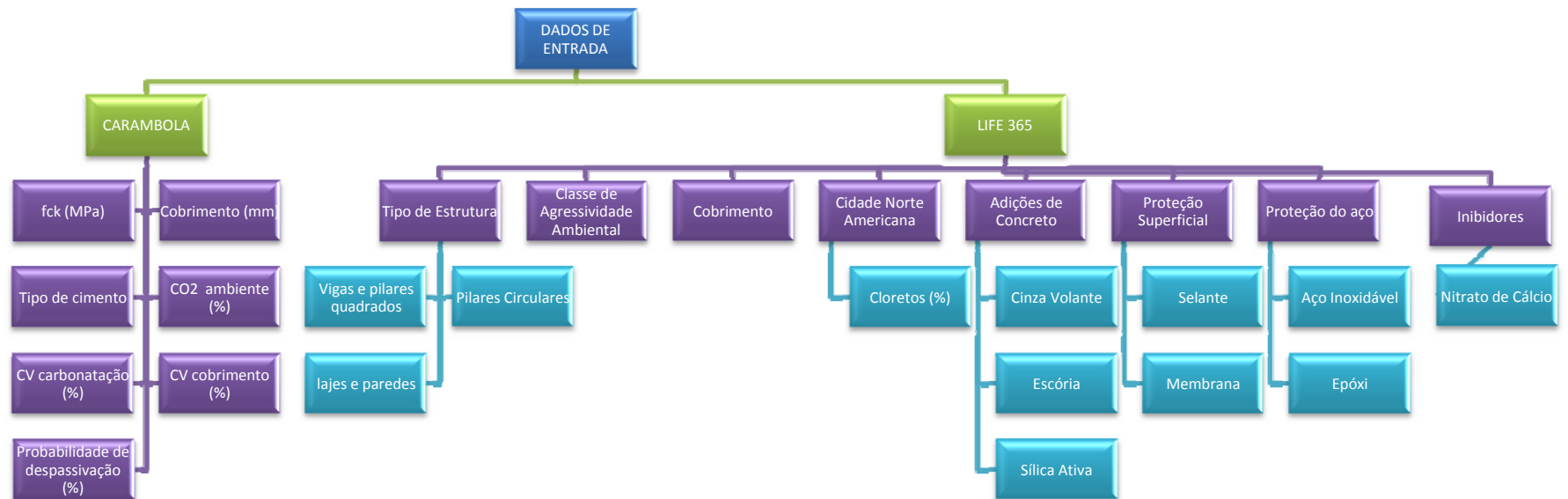
Nesse trabalho será estudada a vida útil de projeto, que corresponde ao período de iniciação. Foi realizado um estudo dos softwares para determinar os dados de entrada em cada um, bem como analisar os dados que seriam pertinentes para o uso neste trabalho, de acordo com o objetivo do mesmo.

Como o objetivo é verificar a vida útil das estruturas de concreto armado de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 6118:2014, serão apresentados os dados de entradas dos softwares Carambola e Life 365, e também os dados utilizados em cada software para a obtenção da vida útil de projeto e verificar se atendem a vida útil mínima de 50 anos.

Com a ajuda dos softwares, serão realizadas combinações de variáveis existentes em cada um para determinar os parâmetros de projeto visando atender a vida útil mínima, intermediária e superior, da ABNT NBR 15575:2013. E por fim será feito uma análise comparativa dos softwares com base nos resultados obtidos de vida útil.

A seguir a Figura 13 representa de forma resumida os dados de entrada de cada software.

Figura 13: Dados de entrada dos softwares Carambola e Life 365



3.1 Dados De Entrada Carambola

No software Carambola, o primeiro passo é selecionar a opção determinista ou probabilista e em seguida fornecer os dados. Para o método determinista são necessários os dados a seguir:

- Fck (Mpa)
- Tipo de cimento
- Cobrimento (cm)
- Concentração de CO₂ no ambiente (%)

Para o método probabilista é necessário entrar também com os seguintes dados:

- CV Carbonatação (%)
- CV Cobrimentos (%)
- Probabilidade de despassivação (%)

Onde CV= Coeficiente de Variação

Nos dados de entrada o fck, tipo de cimento e cobrimento são variáveis e seus valores são de acordo com a classe de agressividade da NBR 6118:2014.

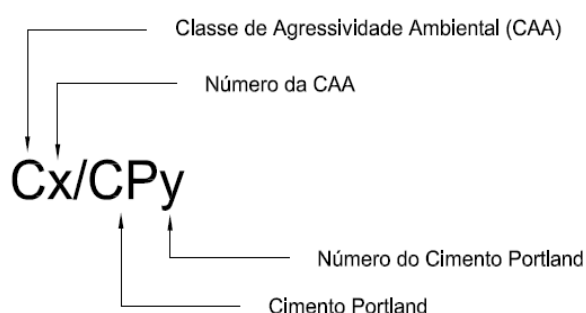
A concentração de CO₂ no ambiente adotado é de 0,1%, segundo Helene (1993), e adotou-se CV carbonatação igual a 25% e CV cobrimento igual a 25% segundo Helene (1997). Para a probabilidade de despassivação foi adotado o valor de 50%, este valor chega ao mesmo resultado de vida útil da análise determinista. Esses valores são fixos na análise.

Para cada classe de agressividade foram usados dois tipos de cimento. Segundo Helene (1997) para reduzir a profundidade de carbonatação são preferíveis os cimentos tipo CP-I e CP-V e para reduzir a penetração de cloretos são preferíveis os cimentos com adições tipo CP-III e CP-IV, assim como adição extra de sílica ativa, microsílica e cinza de casca de arroz.

O programa Carambola tem disponível apenas o CP-I, CP-III E CP-IV. Portanto para classe de agressividade I e II, foram usados os cimentos CP I, que apesar de não ser um cimento comercializado sua composição é a mais parecida com a do cimento CP V, e o CP-III que é o mais utilizado em construções de ambientes urbanos em Brasília. E para a classe de agressividade III e IV, utilizaram-se os cimentos CP-III e CP-IV.

Foi utilizada uma nomenclatura para facilitar a visualização dos resultados. A figura a seguir apresenta o significado da nomenclatura.

Figura 14: Nomenclatura



A seguir é apresentado em forma de tabela as combinações e os dados utilizados no Carambola para a obtenção da vida útil, com as exigências mínimas da ABNT NBR 6118:2014 para f_{ck} e cobrimento, de acordo com a classe de agressividade.

Tabela 12: Dados de entrada utilizados no Carambola.

Nomenclatura	Classe de agressividade ambiental	Tipo de cimento	Fck (MPa)	Cobrimento (mm)
CI/CPI	I	CP-I	20	25
CI/CPIII		CP-III		
CII/CPI	II	CP-I	25	30
CII/CPIII		CP-III		
CIII/CPIV	III	CP-IV	30	40
CIII/CPIII		CP-III		
CIV/CPIV	IV	CP-IV	40	50
CIV/CPIII		CP-III		
Dados fixos: Concentração de CO ₂ no ambiente = 0,1% CV carbonatação = 25% CV cobrimento = 25% Probabilidade de despassivação = 50%				

A fim de alcançar a vida útil mínima, intermediária e superior, foram realizadas algumas combinações das variáveis que o software possui, primeiramente mantendo o mesmo fck da norma e variando apenas o cobrimento e depois aumentando em 5 MPa o fck e variando o cobrimento.

3.2 Dados De Entrada Life 365

Como dado de entrada é necessário escolher entre vigas e pilares quadrados, pilares circulares ou lajes e paredes. Adotou-se para o estudo vigas e pilares quadrados, com uma seção transversal de 50x50 cm e 4 metros de altura. Como mostra a figura a seguir.

Figura 15: Dados da estrutura adotada para estudo do software Life 365

Select Structure Type and Dimensions	
Type of structure	square column/beams (2-D)
Width (mm)	500.0
Reinf. depth (mm)	30.0
Total length (m)	4
--> Volume of concrete	1.0 cub. met.
Chloride concentration units	% wt. conc.

Diagram dimensions: 500.00 mm (width), 30.00 mm (reinf. depth).

Fonte: Life 365

O programa não aceita cobrimento menor do que 30 mm e maior que 75 mm. Portanto não foi considerado no estudo a Classe de Agressividade Ambiental I, pois o cobrimento é 25 mm (ABNT NBR 6118:2014). O cobrimento e a relação água/cimento utilizada em cada classe de agressividade estão de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014.

As classes de agressividade apresentadas pelo software foram relacionadas com as Classes de Agressividade Ambiental da NBR 6118, da seguinte maneira: Classe II – Pontes de estrada urbana; Classe III – menos de 1500 metros do mar e Classe IV – Zona de respingo do mar.

É necessário escolher a cidade em que se encontra a obra. Como o Life 365 é um software norte americano, deve-se escolher uma cidade nos Estados Unidos. Buscou-se um clima similar ao encontrado no Brasil, portanto foi selecionada a cidade de Charleston, na Carolina do Sul.

As temperaturas médias de acordo com o Life 365 são mínimas de 9°C em janeiro e máximas de 27°C em julho. Ao escolher a cidade, para cada classe de agressividade o software atribui um teor de cloreto. As figuras a seguir apresentam a localização da cidade Charleston na Carolina do Sul, e também suas temperaturas médias de acordo como software.

Figura 16: Localização cidade de Charleston, Carolina do Sul (EUA).

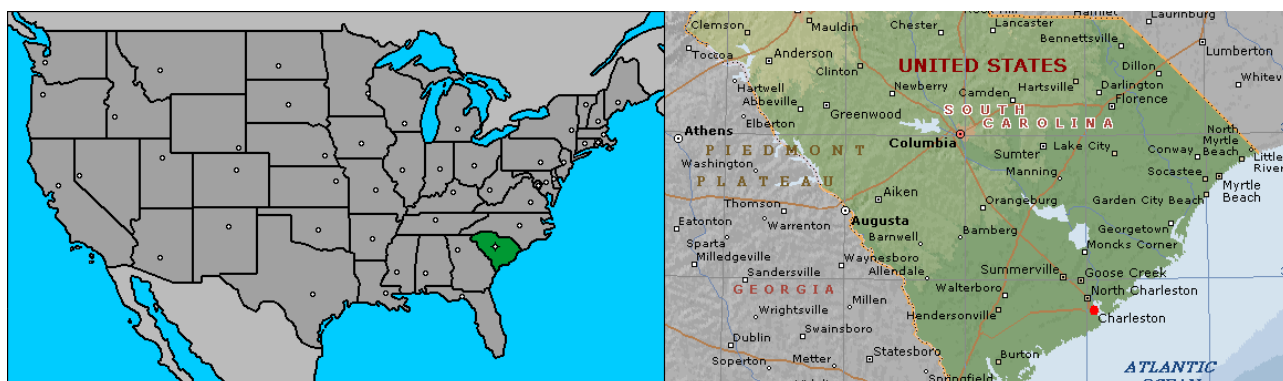
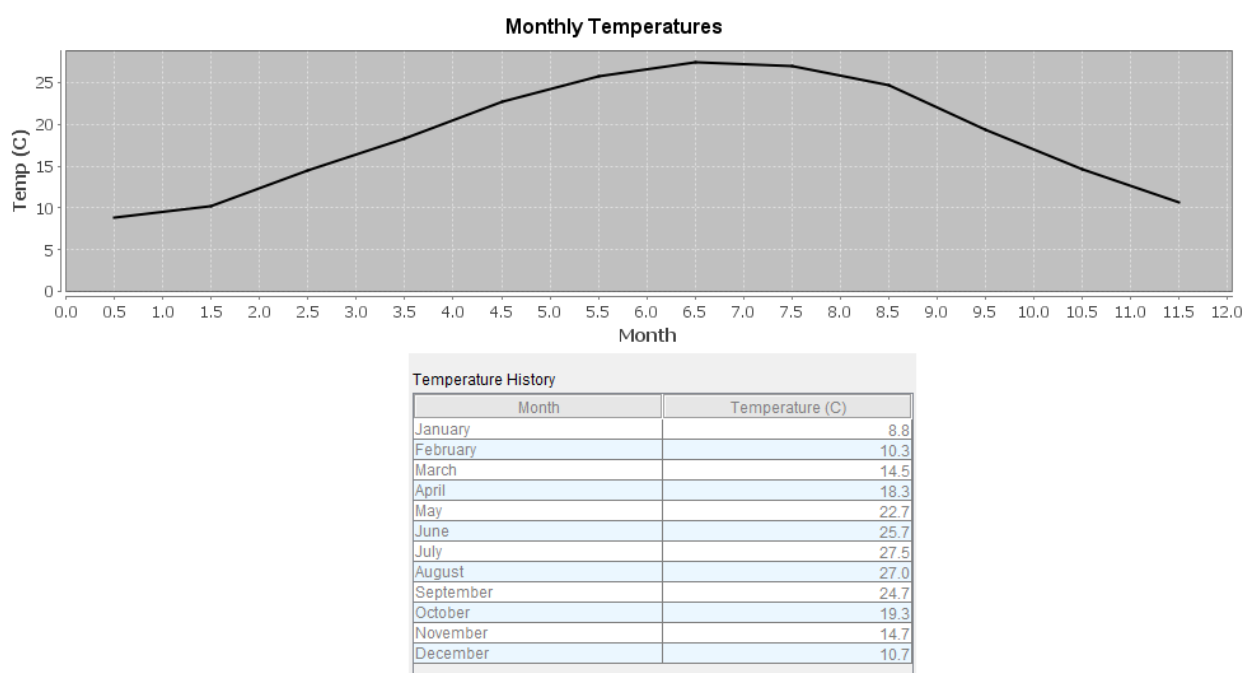


Figura 17: Dados da temperatura média na cidade de Charleston, Carolina do Sul (EUA)



Fonte: Life 365

Usando a mesma composição do Carambola, utilizou-se para classe de agressividade II os cimentos CP I e CP-III. E para a classe de agressividade III e IV, os cimentos CP-III e CP-IV.

O programa não possui a opção de tipo de cimento, porém apresenta a utilização de adições: escória; cinza volante e sílica ativa. Portanto foi considerado como CP III o cimento com adição de escória e CP IV o cimento com adição de cinza volante. Para o CP III considerou-se 52.5% de escória, que é a média do intervalo permitido na norma para este cimento (35% e 70%) e para o CP IV considerou-se também a média 32.5% de cinza volante (pozolana). Para o CP I, não foi considerado nenhuma adição.

A Tabela a seguir apresenta os dados de entrada utilizados no Life 365, para o cálculo da vida útil de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 para cobrimento e relação a/c, e a NBR 5735 E NBR 5736 para escória e cinza volante respectivamente.

Tabela 13: Dados de entrada no Life 365

Nomenclatura	Classe De Agressividade Ambiental	Tipo De Cimento	Cobrimento (mm)	Relação A/C	Adição (%)	
					Escória	Cinza Volante
CII/CPI	II	CP I	30	$\leq 0,60$	-	-
CII/CPIII	II	CP III	30	$\leq 0,60$	52,50%	-
CIII/CPIII	III	CP III	40	$\leq 0,55$	52,50%	-
CIII/CPIV	III	CP IV	40	$\leq 0,55$	-	32,50%
CIV/CPIII	IV	CP III	50	$\leq 0,45$	52,50%	-
CIV/CPIV	IV	CP IV	50	$\leq 0,45$	-	32,50%

Como dados de saída, o software apresenta a vida útil e o custo final da estrutura, ou seja, o custo de construção mais o custo de reparação ao longo do ciclo de vida dessa estrutura. O período de análise (anos) para obter o custo é escolhido e selecionado no software.

Como visto, o programa apresenta tratamentos adicionais para o concreto. A fim de alcançar a vida útil mínima, intermediária e superior, foram realizadas algumas combinações desses tratamentos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos de vida útil, para cada um dos softwares estudados, utilizando os parâmetros da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Na sequência, serão comparados os resultados e por fim a tentativa de variar a composição buscando concretos que atendam a vida útil de projeto mínima, intermediária e superior, como exige a NBR 15.575 (ABNT, 2013).

4.1 Vida útil de estrutura de concreto armado de acordo com a ABNT NBR 6118:2014

4.1.1 Carambola

A seguir, na tabela 14 são apresentados os resultados da vida útil obtidos no programa carambola.

Tabela 14: Vida útil do concreto – Carambola

Nomenclatura	Fck (Mpa)	Cobrimento (mm)	VIDA ÚTIL (anos)
CI/CPI	20	25	30,5
CI/CPIII			21,2
CII/CPI	25	30	57,4
CII/CPIII			39,8
CIII/CPIV	30	40	114,7
CIII/CPIII			96,4
CIV/CPIV	40	50	403
CIV/CPIII			338,6

Os resultados em vermelho representam os que não atingiram a vida útil de 50 anos, e os resultados em azul os que atingiram.

Ao analisar os resultados observa-se que os valores maiores de vida útil são os da classe de agressividade III e IV. Porém o programa Carambola foi desenvolvido para determinar a vida útil de estruturas que sofrem despassivação por carbonatação, e normalmente estruturas que se encontram na classe de agressividade III e IV sofrem despassivação por cloretos. Portanto não são considerados realistas os resultados para classe de agressividade ambiental III e IV.

Já na classe de agressividade I e II, observa-se que o cimento CP-I apresentou vida útil maior que o cimento CP-III. Sabe-se que o CP I é um cimento mais puro que os outros tipos de cimento Portland, e é o tipo mais básico, indicado para o uso em construções que não requeiram condições especiais e não apresentem ambientes desfavoráveis como exposição a águas subterrâneas, esgotos, água do mar ou qualquer outro meio com a presença de sulfatos. A única adição presente no CP-I é o gesso que também se encontra nos demais tipos de cimento Portland, e apresenta cerca de 3%. Portanto quanto mais puro o cimento, maior o pH do concreto e consequentemente menor será a profundidade de carbonatação. Sendo assim, o CP I apresentou maior vida útil que o CP III.

Segundo HELENE (1997) a maioria dos edifícios tem estrutura de concreto aparente nas garagens, que devem ser considerados ambientes externos, pois sempre estão em contato direto com o exterior. Logo, garagens, térreo, pilares de fachada, cisternas e reservatório superior e cobertura são considerados em Brasília, por exemplo, como classe de agressividade II. Assim, tomemos como base os resultados obtidos para classe de agressividade II.

Para o cimento CP-I a vida útil é de 57,4 anos, e para o CP-III a vida útil é de 39,8 anos. Sabe-se que o CP-I não é um cimento comercializado no Brasil, porém é similar em composição ao cimento CP V. Contudo, o software não apresenta como opção o cimento CP V. Mas, acredita-se que este tipo de cimento apresentaria comportamento superior ao CP I, por ser mais fino e que possivelmente resultaria em vida útil maior que 50 anos. Já o CP-III que é um cimento utilizado em Brasília, sua vida útil é de 39,8 anos, e não alcançou a vida útil mínima de 50 anos de uma estrutura de concreto armado.

Portanto, apenas o CP I, quando na classe de agressividade II atendeu a vida útil mínima de 50 anos, utilizando os parâmetros exigidos na ABNT NBR 6118:2014 no programa Carambola.

4.1.2 Life 365

A Tabela 15 a seguir apresenta os resultados da vida útil obtidos no programa Life 365.

Tabela 15: Vida útil do concreto – Life 365

Nomenclatura	Cobrimento (mm)	Relação A/C	Adição (%)		Vida útil (anos)
			Escória	Cinza Volante	
CII/CPI	30	$\leq 0,60$	-	-	33,0
CII/CPIII	30	$\leq 0,60$	52,50%	-	41,5
CIII/CPIII	40	$\leq 0,55$	52,50%	-	8,3
CIII/CPIV	40	$\leq 0,55$	-	32,50%	7,7
CIV/CPIII	50	$\leq 0,45$	52,50%	-	9,3
CIV/CPIV	50	$\leq 0,45$	-	32,50%	8,1

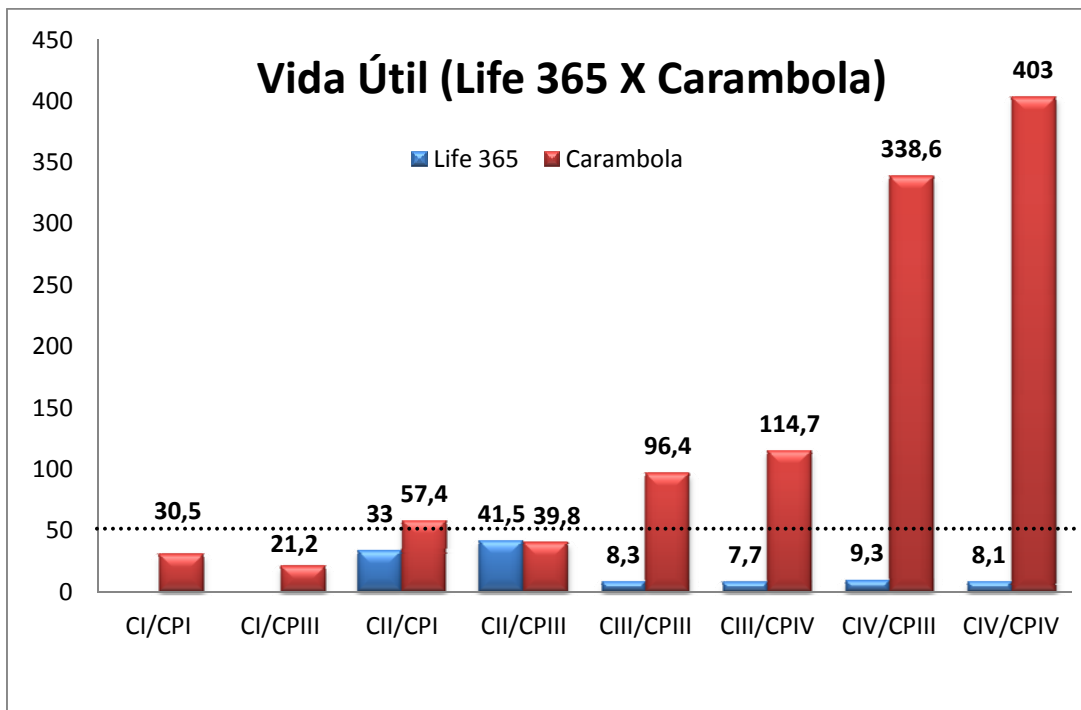
Assim como nos resultados do Carambola, foram marcados os resultados da vida útil em cores. No caso dos resultados do Life 365, nenhum resultado atingiu a vida útil mínima de 50 anos, por isso todos estão em vermelho.

Os maiores valores de vida útil foram na classe de agressividade II, com 33 anos para o cimento CP I e 41,5 anos para o CP III. Observa-se que há uma redução significativa na vida útil da classe de agressividade II para as classes III e IV. O Life 365 estima a vida útil utilizando o modelo de penetração de íons cloreto, que ocorre normalmente nas classes de agressividade III e IV, por isso os valores são menores para essas classes, pois a agressividade do meio é bem maior do que na classe II.

4.1.3 Life 365 X Carambola

A seguir é apresentado um comparativo em forma de gráfico da vida útil do Life 365 *Versus* Carambola.

Figura 18: Vida útil (Life 365 X Carambola)



No gráfico, a linha horizontal representa a idade da VUP mínima de 50 anos. Observa-se que no Life 365 para a classe de agressividade II a vida útil é de 41,5 anos para CP III e 33 anos para o CPI. Contrariando os resultados obtidos no Carambola, onde a vida útil do CP III foi inferior à do CP I. Isso se dá pelo fato de o Life 365 utilizar o modelo de penetração de cloreto enquanto o Carambola utiliza o modelo de carbonatação. Como foi considerada uma adição de escória no cimento, considerando-o como CP III, a vida útil aumentou devido ao fato das adições aumentarem a vida útil do concreto submetido à penetração de cloreto. Logo os resultados estão de acordo.

Nota-se de forma clara a dispersão dos resultados do Carambola para as classes de agressividade III e IV. Como já mencionado anteriormente esses resultados não foram considerados satisfatórios, devido o programa ter sido desenvolvido para calcular a vida útil pelo método da carbonatação, logo o programa interpretou os dados de cobrimento e resistência característica do concreto para uma estrutura que sofre a despassivação por carbonatação, ou seja, classe de agressividade I e II. Como foram entrados os dados das classes III e IV, que são bastantes elevados comparados aos da I e II, o resultado da vida útil também foi elevada.

Portanto recomenda-se o uso do software Carambola para as classes de agressividade I e II e o software Life 365 para as classes de agressividade III e IV. Considerando os resultados do Carambola para as CAA I e II e os resultados do Life 365 para as CAA III e IV, conclui-se que não foi alcançado a vida útil de 50 anos em nenhum caso, exceto para o cimento CP I na classe de agressividade II.

4.2 Parâmetros para atender a vida útil de acordo com a ABNT NBR 15575:2013

Para determinar os parâmetros necessários para atender a vida útil de projeto (VUP) mínima, intermediária e superior, 50, 63 e 75 anos respectivamente, de acordo com a Norma de Edificações Ambientais – Desempenho (NBR 15575:2013) foi utilizado o programa Carambola e Life 365. Adotou-se o Carambola para as classes de agressividade I e II, e o Life 365 para as classes de agressividade III e IV.

4.2.1 Carambola

Existem várias combinações que podem ser feitas no Carambola para atender uma vida útil desejada. Buscando atender aos requisitos da ABNT NBR 15575:2013 sobre a vida útil mínima, intermediária e superior das classes de agressividade I e II, foram realizadas algumas combinações apresentadas na tabela 16. Para cada caso foram realizados dois cálculos, primeiramente foi mantido o mesmo f_{ck} da norma e variou apenas o cobrimento e depois aumentou em 5 MPa o f_{ck} e variou o cobrimento.

Tabela 16: Vida útil mínima, intermediária e superior.

Nomenclatura (1)	Fck (Mpa) (2)	Cobrimento (mm) (3)	Acréscimo de fck (Mpa) (4)	Acréscimo de Cobrimento (mm) (5)	VIDA ÚTIL (anos) (6)	VUP (7)
CI/CPI	20	32	0	7	50	M
		36	0	11	63,3	I
		40	0	15	78,1	S
	25	28	5	3	50	M
		32	5	7	65,3	I
		35	5	10	78,1	S
CI/CPIII	20	39	0	14	51,6	M
		44	0	19	65,6	I
		48	0	23	78,1	S
	25	34	5	9	51,2	M
		38	5	13	63,9	I
		42	5	17	78,1	S
CII/CPI	25	30	0	0	57,4	M
		32	0	2	65,3	I
		35	0	5	78,1	S
	30	24	5	-6	50	M
		27	5	-3	63,2	I
		30	5	0	78,1	S
CII/CPIII	25	34	0	4	51,2	M
		38	0	8	63,9	I
		42	0	12	78,1	S
	30	30	5	0	54,2	M
		33	5	3	65,6	I
		36	5	6	78,1	S
		Onde:	M - Vida útil mínima I - Vida útil intermediária S - Vida útil superior			

As colunas 4 e 5 da tabela, representam o acréscimo de fck e o acréscimo de cobrimento, respectivamente, referente aos valores da ABNT NBR 6118:2013. A coluna 7 representa em qual vida útil (mínima, intermediária e superior) esses parâmetros se encaixam. Os valores negativos na coluna 5 representam valores inferiores aos apresentados na norma ABNT NBR 6118:2013, porém recomenda-se sempre obedecer os valores de norma, o que resultaria em maiores valores de VUP.

Observa-se que aumentando a resistência característica do concreto em 5 MPa, os valores de cobrimento teriam que sofrer pequenos incrementos em relação ao previsto em norma, para atender os valores de VUP da NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Na coluna 3 foram utilizados valores variados de cobrimento, sem seguir nenhuma regra, pois esses valores foram utilizados para atender apenas a VUP, mínima intermediária e superior. No entanto recomenda-se adotar cobrimentos múltiplos de 5 mm.

4.2.2 Life 365

Foram realizados cálculos mantendo os mesmos parâmetros da norma, porém aumentando o cobrimento até que se chegou ao cobrimento máximo permitido pelo programa (75 mm), e também utilizou-se as proteções superficiais membrana e selante, e mesmo assim nenhum resultado alcançou 50 anos de vida útil. Por isso foram realizadas outras combinações apresentadas a seguir, a fim de chegar aos valores de vida útil mínima, intermediária e superior.

A tabela 17 apresenta as combinações realizadas para a classe de agressividade III e a tabela 18 para a classe de agressividade IV, para alcançar a vida útil mínima intermediária e superior. Os valores de cobrimento e a/c que estão na cor cinza, correspondem aos mesmos valores da NBR 6118.

Observa-se que para as duas classes de agressividade, mesmo diminuindo a relação água/cimento e aumentando o cobrimento (OP1 e OP2), não foi suficiente para alcançar a vida útil mínima de 50 anos.

Existem várias combinações que podem ser feitas para alcançar os valores para vida útil mínima, intermediária e superior. As tabelas 17 e 18 apresentam algumas dessas combinações, como aumentar o cobrimento e reduzir a relação água cimento, além de adicionar combinações de tratamentos como a sílica ativa, inibidor nitrato de cálcio, membrana e aço inox.

Tabela 17 – Vida útil mínima, intermediária e superior – CAA III

Padrão	Cimento	Cobrimento	a/c	Tratamento	Vida Útil (anos)	VUP
	CPIII	40	0,55			
	CPIV					
OP1	CPIII	60	0,5	-	23,5	-
	CPIV	60	0,5	-	20	-
OP2	CPIV	75	0,45	-	45,5	-
	CPIV	75	0,45	-	38,3	-
OP3	CPIII	50	0,45	Sílica 8%	65,8	I
	CPIV	50	0,45		54,8	M
OP4	CPIII	60	0,45	Sílica 8%	87,9	S
	CPIV	60	0,45		72,6	I
OP5	CPIII	60	0,45	Inibidor (15 L/m³)	74,2	I
	CPIV	60	0,45		62,2	M
OP6	CPIII	50	0,45	Inibidor (20 L/m³)	79,7	S
	CPIV	50	0,45		66,7	I
OP7	CPIII	50	0,55	Sílica 8% + Inibidor (10 L/m³)	73,9	I
	CPIV	50	0,55		61,8	M
OP8	CPIII	40	0,5	Sílica 8% + Inibidor (15 L/m³) + membrana	79,8	S
	CPIV	40	0,5		68,8	I
OP9	CPIII	40	0,55	Aço inox	75,2	S
	CPIV	40	0,55		63,4	I
				Onde:	M – Vida Útil Mínima I – Vida Útil Intermediária S – Vida Útil Superior	

Portanto, para atender a vida útil mínima de projeto para estruturas na classe de agressividade III, tanto para o cimento CP III como CP IV, basta reduzir o fator a/c de 0,55 para 0,45, aumentar 1 cm no cobrimento (de 40 para 50 mm) e adicionar 8% de sílica ativa.

Para uma vida útil intermediária, seria possível utilizar o cimento CP III com as mesmas recomendações anteriores. Já para a vida útil superior uma opção interessante seria utilizar o CP III, com cobrimento de 60 mm e a/c de 0,45 além da adição de 8% de sílica ativa ou apenas utilizar o aço inox e cimento CP III, mantendo os demais parâmetros da NBR 6118.

Tabela 18 - Vida útil mínima, intermediária e superior – CAA IV

Padrão	Cimento	Cobrimento	a/c	Tratamento	Vida Útil (anos)	VUP
	CPIII	50	0,45			
	CPIV					
OP1	CPIII	70	0,4	-	24,3	-
	CPIV	70	0,4	-	19,6	-
OP2	CPIV	75	0,4	-	32,8	-
	CPIV	75	0,4	-	26,2	-
OP3	CPIII	60	0,4	Sílica 8%	76,9	S
	CPIV	60	0,4		61,3	M
OP4	CPIII	70	0,45	Sílica 8%	78,2	S
	CPIV	70	0,45		62,3	M
OP5	CPIII	70	0,4	Inibidor (15 L/m³)	62,6	M
	CPIV	70	0,4		50,1	M
OP6	CPIII	70	0,4	Inibidor (20 L/m³)	86,6	S
	CPIV	70	0,4		64,3	I
OP7	CPIII	50	0,45	Sílica 8% + Inibidor (10 L/m³)	71,5	I
	CPIV	50	0,45		57,1	M
OP8	CPIII	50	0,45	Sílica 8% + Inibidor (10 L/m³) + membrana	86,1	S
	CPIV	50	0,45		71	I
OP9	CPIII	50	0,45	Aço inox	56,8	M
	CPIV	50	0,45		45,5	-
OP10	CPIII	60	0,45	Aço inox	78,5	S
	CPIV	60	0,45		83,4	S
			Onde: M – Vida Útil Mínima I – Vida Útil Intermediária S – Vida Útil Superior			

Analisando os resultados da Tabela 18, nota-se que para a classe de agressividade IV para atingir a vida útil mínima seria necessário o uso do cimento CP IV, e para a vida útil superior o uso do cimento CP III, além de reduzir o fator de a/c de 0,45 para 0,40, aumentar 1 cm no cobrimento (de 50 para 60) e adicionar 8% de sílica ativa, ou manter o parâmetro da norma para o fator a/c e aumentar 2 cm no cobrimento (de 50 para 70) e adicionar 8 % de sílica ativa.

Para uma vida útil intermediária, seria possível utilizar o cimento CP III com as mesmas recomendações anteriores, ou manter os parâmetros da norma e acrescentar 8% de sílica ativa e 10 l/m³ de inibidor utilizando também o CP III.

Observa-se que em alguns casos é possível manter os parâmetros da NBR 6118, e acrescentar alguns tratamentos para chegar pelo menos na vida útil mínima, como é o caso da OP9 na tabela 17 e OP7 e OP8 na tabela 18. E à medida que é acrescentado mais combinações de tratamentos adicionais, menor é o acréscimo de cobrimento e redução da relação a/c.

Para a classe de agressividade III o aço inox não precisa de combinação para apresentar uma vida útil alta, ou seja, apenas o uso dele com os parâmetros da norma NBR 6118:2013 é suficiente para alcançar a vida útil superior. Já na classe de agressividade IV, o CPIV não alcançou a vida útil mínima, mas o acréscimo de um cm no cobrimento foi suficiente para o CPIII e CPIV ultrapassarem a vida útil superior, o que mostra que apenas o uso dele, garante um grande ganho de vida útil.

Além da vida útil, o Life 365 apresenta resultados do custo da construção e de reparo ao longo de determinado tempo. Foi observado que o custo de construção para estruturas com maiores números de tratamentos adicionais, é maior do que para estruturas com pouco ou nenhum tratamento adicional. No entanto ao longo de um período de tempo como, por exemplo, 100 anos, o custo final da estrutura, ou seja, o custo de construção mais o custo de reparo é bem menor para essas estruturas que receberam esses tratamentos adicionais, evidenciando o que diz a Regra de Sitter já apresentada nesse trabalho. Logo, conclui-se que o gasto inicial é maior para essas estruturas, porém ao longo dos anos as intervenções de reparos serão menores, gerando um custo total menor para essa estrutura.

Neste trabalho foram apresentadas algumas das possíveis combinações de tratamentos adicionais para mostrar que é necessário o uso de adições e proteções do concreto e do aço para obter-se a vida útil desejada. No entanto é necessário realizar um estudo no custo final com essas alterações, para saber qual é melhor economicamente, pois o objetivo é que se tenha um ganho na vida útil, mas com o menor custo adicional possível.

Portanto em ambientes mais agressivos e que sofrem um maior ataque de cloretos (CAA III e CAA IV), é de suma importância que haja algum tipo de tratamento adicional no concreto ou no aço para aumentar a vida útil das estruturas.

4.2.3 Análise comparativa Carambola X Life 365

O Carambola é um software que possui um modelo básico para determinação da vida útil, e existe muitos pontos controversos, como por exemplo, não possuir variáveis que alteram de forma significativa os resultados como a umidade relativa do ar, que o Life 365 possui. Portanto quanto mais variáveis tiver um programa, mais próximo da realidade serão seus resultados.

Isso pode ser observado nos resultados obtidos em ambos os softwares, onde no carambola foi preciso apenas alterar os cobrimentos e o fck, para obter os resultados de vida útil mínima, intermediária e superior, sendo que nessas alterações o máximo de acréscimo de cobrimento foi de 2,3 cm para CI/CPIII alcançar a vida útil superior que é de 75 anos, e o fck não foi alterado nesse caso. Já no Life 365 aumentar o cobrimento até o máximo permitido que é de 75mm , ou seja, acréscimos máximos de 3,5 cm para CAIII e 2,5 cm para CAIV, não foram suficientes nem para alcançar a vida útil mínima de 50 anos.

O Life 365 pode ser considerado um software conservador, pois foi criado para áreas dos Estados Unidos da América, onde possuem muitas zonas industriais, muitos locais que nevam ocasionando uma grande concentração de sal devido o derretimento da neve, entre outros. Logo os resultados podem ser mais rigorosos do que comparado ao Brasil. Portanto, para validação dos resultados seria necessário comparar com obras existentes.

Nota-se que há uma diferença muito grande nos resultados do Carambola e do Life 365. Apesar do Life 365 ser mais conservador os seus resultados podem ser considerados mais satisfatórios, pois ele engloba muitas variáveis que influenciam sobremaneira os resultados.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

O desenvolvimento teórico e prático deste trabalho acerca da vida útil de projeto de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 6118:2014 e da ABNT NBR 15575:2013, possibilitou a formulação de algumas considerações finais, as quais são listadas a seguir:

- De acordo com os softwares utilizados, os parâmetros mínimos previstos pela NBR 6118:2014, não são suficientes para garantir uma vida útil mínima de 50 anos;
- Para as classes de agressividade I e II, utilizando o software Carambola é necessário aumentar em até 23 mm o cobrimento ou elevar a resistência do concreto em 5 MPa e aumentar o cobrimento em 17 mm, para atingir VUP mínima, intermediária e superior
- Utilizando o Life 365 para as classes de agressividade III e IV, nem mesmo aumentando o cobrimento e diminuindo a relação água/cimento não foi alcançado a VUP mínima de 50 anos. Isso mostra que não é necessário apenas rever os parâmetros que estão na norma, mas também acrescentar tratamentos no concreto e/ou no aço;
- Para atingir a vida útil mínima de 50, 63 e 75 anos utilizando o Life 365, verificou-se a necessidade de utilizar aço inox ou aumentar o cobrimento, reduzir a relação a/c e acrescentar sílica ativa ou inibidor de corrosão;
- O carambola possui um modelo para determinação de vida útil muito básico, e o Life 365 apresenta diferentes variáveis para essa determinação, portanto seus resultados são considerados mais satisfatórios do que os resultados do Carambola.
- O programa Carambola foi considerado satisfatório para os resultados da classe de agressividade ambiental I e II, enquanto o Life 365 foi considerado para a classe de agressividade ambiental III e IV.
- É necessário um estudo aprofundado das variáveis que mais afetam a vida útil das estruturas de concreto, para serem acrescentadas como requisitos mínimos nas normas de construção do Brasil, para obter a vida útil mínima de 50 anos, além da vida útil intermediária (63 anos) e

superior (75 anos) apresentadas na ABNT NBR 15575:2013. Pois quanto mais variáveis, mais próximos da realidade estarão os resultados.

- Utilizar tratamentos adicionais no concreto e no aço gera um custo maior para construir, mas ao longo de um período, como por exemplo, após 100 anos, o custo total dessa estrutura é menor comparado a estruturas que não possuem esses tratamentos. Portanto é mais vantajoso economicamente ter um custo mais elevado na hora de construir para gastar menos com reparos ao longo dos anos e ter um custo final menor do que não optar por tratamentos adicionais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de dar continuidade e aprimorar os estudos relativos ao tema desse trabalho, são apresentadas a seguir sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas:

- Medir a carbonatação real da estrutura e comparar com os resultados previstos pelos diferentes softwares de vida útil, observando as variáveis que possuem e o quanto elas influenciam na vida útil, buscando os modelos que mais se ajustam a realidade;
- Um passo significativo para avanços nessa área é o desenvolvimento de softwares computacionais apropriados, incluindo modelos matemáticos confiáveis e robustos suportados por uma base de dados experimentais adequadas para uso no Brasil, pois cada país apresenta condições ambientais, químicas e físicas diferentes que podem influenciar no resultado final da vida útil;
- Realizar um estudo aprofundado no impacto que os tratamentos adicionais causam no custo da estrutura, buscando qual tipo de combinação de variáveis tem o melhor custo benefício para estrutura em relação à vida útil;
- Estudar quais os fatores que mais afetam no resultado da vida útil, para que as normas brasileiras sejam reformuladas com os requisitos mínimos necessários para obter-se uma vida útil de 50, 63 e 75 anos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5732**. Cimento Portland Comum, 1991.

_____. **NBR 5733**. Cimento Portland com Alta Resistência Inicial, 1991.

_____. **NBR 5735**. Cimento Portland de Alto Forno, 1991.

_____. **NBR 5736**. Cimento Portland Pozolânico, 1991.

_____. **NBR 6118**. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2014.

_____. **NBR 11578**. Cimento Portland Composto. 1991.

_____. **NBR 15575**. Edificações Habitacionais – Desempenho, 2013.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras**: Iniciação por cloretos, 2001, 277p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2001.

ANDRADE, J.J.O.; DAL MOLIN, D.C.C. **Considerações quanto aos modelos empregados para a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado**: Despassivação por íons cloreto. Revista de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Portugal, 2003, p.31-44.

BARBOSA, M. C. **Estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado imediatamente após sua execução**, 2009, 170p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**, 2005, 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão das armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1º ed., São Paulo: Ed. Pini, 1997. 237 p.

DA SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**, 2006, 236p. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia dos Materiais: Interunidades, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DA SILVA, T. J. **Como estimar a vida útil de estruturas projetadas com critérios que visam a durabilidade**. In: 2º. Workshop sobre Durabilidade das Construções, 2001, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2001. v.1. p.133 – 143.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1ª Edição. São Paulo: PINI, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1996. 345p.

HELENE, P. R. L. **Corrosão de armaduras para concreto armado**. São Paulo: Ed. Pini, 1986.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993, 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Anais... Porto Alegre, 1997.

ISAIA, G. C. **Durabilidade do concreto: uma revisão**. In: WORKSHOP SOBRE CORROSÃO DA ARMADURA DO CONCRETO, 1999, Colloquia. Anais... São José dos Campos, 1999.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto** : Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008, 674p.

MISSAU, Fabiano. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza** de casca de arroz, 2004, 146p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997, 828p.
NP - Norma Portuguesa. **EN 1504-1**. Produtos e Sistemas Para Proteção de Estruturas de Betão: Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade, 2006.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**, 2010, 265p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.